



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

---

---

---

**USO DEL AGUA EN CULTIVOS DE IMPORTANCIA AGRÍCOLA EN  
LAS UNIDADES DE RIEGO DEL ESTADO DE ZACATECAS**

**TESIS PROFESIONAL**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

**PRESENTA**  
LAURA MALENI ORDOÑEZ HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS**  
M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2020.



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

---

---

**USO DEL AGUA EN CULTIVOS DE IMPORTANCIA AGRÍCOLA EN  
LAS UNIDADES DE RIEGO DEL ESTADO DE ZACATECAS**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

**PRESENTA**

LAURA MALENI ORDOÑEZ HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS**

M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

**CO-DIRECTOR**

DR. RONALD ERNESTO ONTIVEROS CAPURATA

**ASESORES**

M.C. FABIEL VÁZQUEZ CRUZ

DR. RAÚL BERDEJA ARBEU

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2020.

La presente tesis titulada: Uso del agua en cultivos de importancia agrícola en las unidades de riego del Estado de Zacatecas realizada por Laura Maleni Ordoñez Hernández, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

Facultad de Ingeniería Agrohídrica

Consejo Particular integrado por:

Firma

Director: M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín



---



---

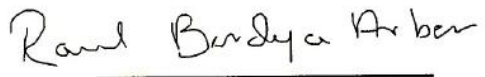
Co-Director: Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

Asesor: M.C. Fabiel Vázquez Cruz



---

Asesor: Dr. Raúl Berdeja Arbeu



---

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2020.

El presente trabajo forma parte del Cuerpo Académico denominado: BUAP CA-231-Manejo de Recursos Fitogenéticos y de la línea de Investigación: Manejo y Conservación de Recursos Fitogenéticos de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica. El desarrollo de la tesis fue financiado por el fondo SADER-CONACYT dentro del marco del Proyecto 2017-2-291372 Titulado “Plataforma WEB Informativa sobre el Uso del Agua en la Agricultura Nacional” en colaboración con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo lo dedico a:*

*Mi Padre Celestial, quién me ha llenado de bendiciones y ha estado presente en cada paso que doy, por brindar dones especiales que me han ayudado y fortalecido, por haber puesto en mi camino a personas que han sido soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.*

*A mi mamá María de los Ángeles Hernández Hernández y abuelos Adán Hernández Pérez y Estela Hernández Hernández quienes con su amor, paciencia, esfuerzo y dedicación me brindaron los medios y valores para culminar con mis estudios universitarios, gracias por inculcar en mí la perseverancia, respeto y responsabilidad; todo esto se los debo a ustedes.*

*A mis hermanos Carlos Ordoñez Hernández y Jeniffer Ordoñez Hernández por su apoyo incondicional en diferentes etapas de mi vida, por sus consejos, compañía y amor. A toda mi familia por estar al pendiente de cada paso que doy, por sus palabras de reflexión y sabiduría.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por ser organismos que promueven y estimulan el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el país, además de otorgar el apoyo económico para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Ronald E. Ontiveros Capurata, por la invitación a participar en el proyecto “Plataforma WEB Informativa sobre el Uso del Agua en la Agricultura Nacional”, la cual permitió desarrollar habilidades y nuevos conocimientos en el área, además de dirigir y guiar en la dirección de la tesis; por inspirar a su equipo de trabajo.

A mi director y asesores de tesis: M.C. Guillermo J. Pérez Marroquín, Dr. Raúl Berdeja Arbeu y M.C. Fabiel Vázquez Cruz no sólo en la elaboración del presente trabajo, sino por la orientación, sugerencias e impartir su conocimiento para desarrollarme profesionalmente.

Agradezco a los docentes de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por haber compartido su conocimiento a lo largo de mi preparación profesional.

Finalmente agradezco a mis amigos y compañeros, por el apoyo brindado en este proceso.

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE DE CUADROS .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ii
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo general .....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
III. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
3.1. La importancia del agua en la agricultura de riego en México.....	4
3.2. La problemática del agua de riego en la agricultura mexicana .....	4
3.3. Distritos de riego (DR) y unidades de riego (UR) en México .....	5
3.3.1. Unidades de riego en el estado de Zacatecas.....	6
3.4. Evapotranspiración (ET) .....	6
3.4.2. Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia .....	10
3.5. Productividad del agua .....	10
IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
4.1. Ubicación.....	12
4.2. Datos vectoriales .....	¡Error! Marcador no definido.
4.3. Datos climáticos .....	12
4.4. Elaboración de un Sistema de Información Geográfico .....	13
4.5. Caracterización agrícola del estado de Zacatecas .....	13
4.6. Análisis espacio-temporal de las estaciones climáticas del estado de Zacatecas.....	13
4.7. Estimación de los valores de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) mediante métodos empíricos .....	14
4.7.1. Análisis estadístico .....	15
4.8. Estimación de la productividad del agua (WP) .....	15
4.8.1. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET <sub>c</sub> ) .....	15
4.8.2. Cálculo de la productividad del agua del cultivo (WP).....	16

<b>V.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>18</b>
5.1.	Sistema de Información Geográfico.....	18
5.2.	Caracterización agrícola del estado de Zacatecas .....	18
5.2.1.	Características de la agricultura en el estado de Zacatecas.....	18
5.2.2.	Características de la agricultura en los principales municipios con unidades de riego en el estado de Zacatecas.....	28
5.3.	Análisis espacio-temporal de estaciones climáticas del estado de Zacatecas .....	41
5.3.1.	Distribución de la precipitación total, temperatura máxima y temperatura mínima promedio anual en el estado de Zacatecas .....	41
5.3.2.	Distribución de precipitación acumulada, temperatura máxima y temperatura mínima promedio mensual en el estado de Zacatecas .....	43
5.3.3.	Distribución de estaciones climáticas con registros extremos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada.....	64
5.4.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ).....	66
5.4.1.	Calibración de la humedad relativa (HR) .....	66
5.4.2.	Comparación entre métodos para estimación de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ).....	67
5.4.3.	Análisis espacial de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por el método de Hargreaves y Samani.....	69
5.5.	Productividad del agua del cultivo (WP).....	71
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>64</b>
<b>VII.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>66</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>72</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Página
<b>Cuadro 1.</b> Métodos para estimar ETo. ....	14
<b>Cuadro 2.</b> Fechas de siembra y duración del ciclo para el cultivo de maíz, chile y frijol en el ciclo primavera-verano (SAGARPA, 2015; INIFAP, 2006; INIFAP, 2003). ....	16
<b>Cuadro 3.</b> Duración fenológica y coeficientes de cultivo (Kc), (INIFAP, 2006; Allen <i>et al.</i> 1998). ....	16
<b>Cuadro 4.</b> Características generales de la agricultura en el estado de Zacatecas (SIAP, 2019). ....	20
<b>Cuadro 5.</b> Principales municipios con unidades de riego (UR) en el estado de Zacatecas. ....	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<b>Cuadro 6.</b> Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y análisis de varianza con el 95% de confiabilidad por los métodos de ETo comparados con FAO 56 Penman-Monteith en el periodo (1981-2010). ....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
<i>Figura 1. Representación de la evaporación y transpiración en el proceso de evapotranspiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual (Allen et al., 1998).</i> .....	7
<i>Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración relacionados a conceptos de evapotranspiración (Allen et al., 1998).</i> .....	8
<i>Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) y bajo condiciones no estándar (ET<sub>c aj</sub>) (Allen et al., 1998).</i> .....	8
<i>Figura 4. Mapa de localización.</i> .....	12
<i>Figura 5. Distribución de la superficie agrícola en el estado de Zacatecas según la modalidad (SIAP, 2017a).</i>	19
<i>Figura 6. Superficie cultivada por municipios en el estado de Zacatecas en el año 2018 (SIAP, 2019).</i> .....	19
<i>Figura 7. Distribución de la superficie sembrada según ciclo y modalidad de cultivo (SIAP, 2019).</i> .....	21
<i>Figura 8. Evolución de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada del estado de Zacatecas en el periodo 2003-2018 (SIAP, 2019).</i> .....	22
<i>Figura 9. Evolución de la superficie según ciclo de cultivo (SIAP, 2019).</i> .....	22
<i>Figura 10. Distribución promedio de los principales cultivos por ciclo agrícola del estado de Zacatecas en el periodo 2003-2018 (SIAP, 2019).</i> .....	23
<i>Figura 11. Evolución de la relación entre superficie cosechada/sembrada (CS) de los principales cultivos para cada modalidad, (SIAP, 2019).</i> .....	24
<i>Figura 12. Evolución del volumen de producción de los principales cultivos en el estado de Zacatecas. a) producción avena forrajera en verde y cultivo de alfalfa. b) producción de cebolla, frijol, chile verde y maíz de grano (SIAP, 2019).</i> .....	25
<i>Figura 13. Valor de producción de los principales cultivos en el estado de Zacatecas. (SIAP, 2019).</i> .....	26
<i>Figura 14. Evolución del rendimiento de cultivo del estado de Zacatecas en el periodo de estudio (2002-2018). a) maíz de grano, chile verde y frijol, b) avena forrajera en verde, tomate rojo y alfalfa (SIAP, 2019).</i> ...	27
<i>Figura 15. Evolución del valor de producción por hectárea sembrada de tomate rojo bajo riego (SIAP, 2019).</i>	28
<i>Figura 16. Superficie sembrada de los principales municipios con unidades de riego en el estado de Zacatecas en el año 2018 (SIAP, 2019).</i> .....	28
<i>Figura 17. Evolución de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada de los municipios en conjunto (Jalpa, Fresnillo, Pánuco, Pinos y Villa de Cos) en el periodo 2003-2018 (SIAP, 2019).</i> .....	29
<i>Figura 18. Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Jalpa en 2018 (SIAP, 2019).</i> .....	30
<i>Figura 19. Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Fresnillo en 2018 (SIAP, 2019).</i> .....	31

<b>Figura 20.</b> Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Pánuco en 2018 (SIAP, 2019).....	31
<b>Figura 21.</b> Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Pinos en 2018 (SIAP, 2019).....	32
<b>Figura 22.</b> Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Villa de Cos del estado de Zacatecas en el año 2018 (SIAP, 2019) .....	32
<b>Figura 23.</b> Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Jalpa bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019). .....	34
<b>Figura 24.</b> Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Fresnillo bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019). .....	36
<b>Figura 25.</b> Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Pánuco bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019). .....	38
<b>Figura 26.</b> Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Pinos bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019). .....	39
<b>Figura 27.</b> Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Villa de Cos bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019).....	40
<b>Figura 28.</b> Evolución de la relación entre superficie cosechada/sembrada (CS) de los principales cultivos en los municipios de Jalpa, Fresnillo, Pánuco, Pinos y Villa de Cos (SIAP, 2019). .....	41
<b>Figura 29</b> Distribución promedio anual de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo 1981 a 2010 en el Estado de Zacatecas (SMN, 2011).....	41
<b>Figura 30.</b> Distribución espacial de precipitación total, temperatura máxima y temperatura mínima media anual (1981-2010).....	43
<b>Figura 31</b> Distribución promedio mensual de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo 1981 a 2010 en el Estado de Zacatecas (SMN, 2011).....	44
<b>Figura 32.</b> Distribución espacial de la precipitación acumulada promedio mensual (1981-2010). .....	46
<b>Figura 33.</b> Distribución espacial de la temperatura máxima promedio mensual (1981-2010).....	47
<b>Figura 34.</b> Distribución espacial de la temperatura mínima promedio mensual (1981-2010).....	48
<b>Figura 35.</b> Distribución de temperaturas máximas, temperatura mínimas y precipitación acumulada promedio mensual en las estaciones climáticas del estado de Zacatecas en el periodo 1981-2010 (SMN, 2011).....	64
<b>Figura 36.</b> Distribución espacial de precipitación acumulada, temperatura máxima y temperatura mínima promedio mensual extrema (1981-2010).....	65
<b>Figura 37.</b> Distribución de la humedad relativa calculada y humedad relativa INIFAP.....	66
<b>Figura 38</b> Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) calculada por diferentes métodos (1981-2010). .....	67
<b>Figura 39.</b> Distribución espacial de la Evapotranspiración de referencia por el método de Hargreaves-Samani (1981-2010).....	70

<b>Figura 40.</b> Distribución espacial a) productividad del agua (WP), b) rendimiento y c) evapotranspiración acumulada del cultivo de maíz (ETc) en el estado de Zacatecas. ....	64
<b>Figura 41.</b> Distribución espacial a) productividad del agua (WP), b) rendimiento y c) evapotranspiración acumulada del cultivo de chile mirasol (ETc) en el estado de Zacatecas. ....	65
<b>Figura 42.</b> Distribución espacial a) productividad del agua (WP), b) rendimiento y c) evapotranspiración acumulada del cultivo de maíz (ETc) en el estado de Zacatecas. ....	66
<b>Figura 43.</b> Distribución de estaciones climáticas en el estado de Zacatecas. ....	74
<b>Figura 44.</b> Distribución de Unidades y Distritos de Riego en el estado de Zacatecas. ....	74
<b>Figura 45.</b> Modelo de Elevación Digital (DEM) del estado de Zacatecas. ....	75
<b>Figura 46.</b> Distribución del uso de suelo y vegetación del estado de Zacatecas. ....	75

---

## RESUMEN

El manejo del recurso hídrico en el Estado de Zacatecas juega un papel importante en el sector agrícola, siendo el agua subterránea la principal fuente de abastecimiento en la agricultura de riego. El análisis estadístico agrícola, la ET<sub>0</sub> y WP permiten ser una guía para la programación de riego en cultivos con mayor superficie de riego. En el presente trabajo de investigación se elaboró un análisis espacio-temporal de variables climáticas anual, mensual y de meses extremos en el periodo de 1981-2010; además de estimó la ET<sub>0</sub> a partir de 6 modelos empíricos con datos de 108 estaciones climáticas, las cuales fueron comparados con el método estándar FAO PM-56. La WP se estimó durante el periodo 2003 a 2010, donde se utilizaron valores de ET<sub>c</sub> por el método de H-S, coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) y rendimiento del cultivo de los cultivos con mayor superficie de riego en el periodo PV (maíz, frijol y chile). La superficie sembrada en el Estado de Zacatecas disminuyó un 5.6 % en el periodo 2003-2018; la precipitación anual en el estado oscila de 294 a 887.7 mm anuales, las máximas temperaturas se presentan en abril y mayo (32 °C) y las mínimas en enero (5.6 °C). La ET<sub>0</sub> por el método de H-S obtuvo mejores resultados estadísticos ( $R^2 = 0.94$ ). Los cultivos de maíz grano y chile mirasol cuentan con WP de 0.01-0.97 y 0.01-2.46 kg m<sup>-3</sup> respectivamente.

**Palabras clave:** variables climáticas, evapotranspiración de referencia, productividad del cultivo.

## ABSTRACT

The management of water resources in the Estado de Zacatecas plays an important role in the agricultural sector, with groundwater being the main source of supply in irrigated agriculture. The agricultural statistical analysis, ET<sub>0</sub> and WP allow to be a guide for irrigation scheduling in crops with a larger irrigation surface. In the present research work, a spatial-temporal analysis of annual, monthly and extreme months climatic variables was carried out in the period 1981-2010; on the other hand, ET<sub>0</sub> was estimated from 6 empirical models with data from 108 climatic stations, which were compared with the standard FAO PM-56 method. The WP was estimated during the period 2003 to 2010, where ET<sub>c</sub> values were used by the H-S method, cultivation coefficients (K<sub>c</sub>) and crop yield of the crops with the largest area of irrigation in the PV period (corn, beans and chili). The area sown in the Estado de Zacatecas decreased 5.6% in the period 2003-2018; The annual precipitation in the state ranges from 294 to 887.7 mm per year, the highest temperatures occur in april and may (32 ° C) and the lowest in january (5.6 ° C). ET<sub>0</sub> by the H-S method obtained better statistical results (R<sup>2</sup> = 0.94). The crops of grain corn and mirasol chili have a WP of 0.01-0.97 and 0.01-2.46 kg m<sup>-3</sup> respectively.

**Key words:** climatic variables, reference evapotranspiration, crop productivity.

## I. INTRODUCCIÓN

En México, los recursos hidráulicos, además de ser escasos, se encuentran mal distribuidos, ya que, en las planicies costeras, a excepción de la Península de Baja California y Sonora, hay abundancia de agua, mientras que en el resto del país es poca o muy escasa.

La precipitación juega un papel importante en la agricultura, ya que permite el mantenimiento y la planeación de los cultivos, desafortunadamente la distribución de la precipitación no es homogénea en todo el país, de modo que hay mayores volúmenes al sur del país y menor es la incidencia en la región norte.

El 76 % del recurso concesionado de agua se usa en el sector agrícola y se estima que la eficiencia del uso del agua es del 45% (CONAGUA, 2018a). Los sistemas de producción bajo riego generan 55 % de la producción agrícola nacional y 70 % de los productos agrícolas de exportación (SIAP, 2017). Actualmente México cuenta con 7.32 millones de hectáreas de superficie de riego (CONAGUA, 2018a), lo que coloca al país entre los principales países en superficie irrigada en América Latina.

En este contexto, el riego ha tenido una función estratégica en el incremento de la producción de alimentos, sin embargo, existe una gran preocupación debido a las bajas eficiencias de aplicación y conducción del agua; 50 % del agua que se consume en los tres sectores se desperdicia. Esta problemática se ha generado desde hace unas décadas provocando incertidumbre en cuanto al uso y aprovechamientos del recurso hídrico en la agricultura. Además, el cambio climático es otro factor que puede reducir la disponibilidad de agua en regiones que ya sufren de estrés hídrico y dependen del riego (Milly *et al.*, 2005).

Tener conocimiento sobre el nivel de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para determinar el uso agrícola del agua es tan importante como administrar los recursos hídricos de manera eficiente (Ahmadi y Fooladmand, 2008). La estimación precisa de ET<sub>o</sub> es esencial para la programación del riego y la planificación y gestión de los recursos hídricos (Al-Ghobari, 2000). La mayoría de los agrónomos e ingenieros estiman ET<sub>o</sub> y coeficientes de cultivo para calcular los requerimientos de agua del cultivo (Martinez-Cob y Tejero-Juste, 2004) informaron que se pueden estimar los valores de ET<sub>o</sub> utilizando mediciones de lisímetro o balance de agua o utilizando datos climatológicos. Sin embargo, los lisímetros

son costosos y requieren un área extensa para obtener una extracción adecuada para las mediciones (Sentelhas *et al.*, 2010), y las mediciones del balance hídrico son laboriosas y costosas. En general, el uso de datos climáticos para estimar ETo es menos costoso y más fácil que otros métodos.

El presente trabajo de investigación pretende estimar el uso del agua por los principales cultivos agrícolas en el estado de Zacatecas, especialmente en las unidades de riego, haciendo un análisis agrícola de los municipios con mayor superficie de unidades de riego, además de determinar la evapotranspiración de referencia mensual en las zonas de mayor producción, de modo que este parámetro permita al agricultor estimar la evapotranspiración del cultivo con datos precisos y sea una guía para la programación eficaz del riego.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Estimar el uso del agua de los principales cultivos agrícolas bajo riego en las unidades de riego del Estado de Zacatecas.

### **2.2. Objetivos específicos**

Elaborar un Sistema de Información Geográfico con la información recopilada y generada sobre el uso del agua en las unidades de riego del Estado de Zacatecas.

Recopilar y analizar información estadística histórica de superficie sembrada, cosechada, siniestrada, producción, rendimiento, y valor de producción de la agricultura de riego y temporal en el Estado de Zacatecas (2003-2018).

Realizar análisis espacio-temporal de variables climáticas cercanas a las unidades de riego en el Estado de Zacatecas.

Estimar los valores de evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) mediante métodos empíricos en las unidades de riego del Estado de Zacatecas.

Estimar la productividad del agua (WP) de los principales cultivos agrícolas en el ciclo primavera-verano con agricultura de riego en el estado de Zacatecas.

### **III. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1. La importancia del agua en la agricultura de riego en México**

En México, el riego es indispensable o necesario en la mayor parte del país para producir los alimentos y las materias primas que demanda el crecimiento de la población y su desarrollo. La precipitación es una fuente adicional para abastecer los requerimientos hídricos en los cultivos agrícolas, sin embargo, ésta no es homogénea en todo el país, estas condiciones naturales han propiciado el avance de la irrigación en la medida que el crecimiento poblacional y el desarrollo económico han elevado la demanda de productos agrícolas (Palacios y Escobar, 2016).

Anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, de los cuales el 72.1 % se pierde por evapotranspiración, el 21.4 % escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2018a).

El agua empleada para fines de riego en el país es de tipo subterránea y superficial (pequeñas presas de almacenamiento y derivación), además de contar con infraestructura que permite el riego en aproximadamente 6.5 millones de hectáreas, donde 3.3 millones corresponden a 86 distritos de riego (DR) y los 3.2 millones restantes a más de 40,000 unidades de riego (UR) estas cifras datan hasta el año 2017 (CONAGUA, 2018a).

Aunque en el país existen regiones donde la agricultura de temporal es exitosa, se estima que el rendimiento en toneladas por hectárea de la superficie bajo riego es de 2.2 a 3.3 veces mayor que la superficie en la modalidad de temporal (CONAGUA, 2018a). En 2018 el valor total de la producción agrícola fue de \$ 641,026,369.01 de los cuales 63.91 % (\$ 409,689,106.28) correspondió a la producción bajo riego y tan sólo 36.09 % (\$ 231,337,262.73) fue atribuida a la agricultura de temporal (SIAP, 2019).

#### **3.2. La problemática del agua de riego en la agricultura mexicana**

En México, la agricultura es el principal sector con mayor recurso hídrico concesionado (76 %), seguido del abastecimiento público con el 14.4 %, para energía eléctrica se cuenta con 4.7 % y en el uso industrial se destina el 4.9 % del recurso hídrico (CONAGUA, 2018a).

Aún no se han considerado los límites potenciales de los recursos hidráulicos, tanto de fuentes superficiales como subterráneas, debido al acelerado crecimiento de la población y el desarrollo de sus diversas actividades productivas, puesto que el uso de estos recursos se ha llevado a cabo sin tomar en cuenta un manejo eficiente. Hoy en día, este crecimiento poblacional y económico ejerce mayor presión sobre las reservas de agua en el país, a tal grado, que los volúmenes demandados son mayores que los suministrados (Reyes y Quintero, 2009). Esta situación ha provocado problemas de escasez de agua superficial y subterránea en varias regiones de México, generando a su vez una mayor competencia por el recurso. De esta forma, la problemática de escasez, mala distribución, uso, competencia, deterioro, desconocimiento y el acceso inequitativo al agua, han ocasionado fuertes conflictos sociales (Reyes y Quintero, 2009) y el riesgo de sobreexplotación de los acuíferos, lo que ha ocasionado una amenaza para el desarrollo de las regiones que dependen del agua del subsuelo para realizar las diversas actividades económicas y para abastecerse de agua potable.

Otra problemática clave se presenta en las fuentes de abastecimiento, debido a extracciones de máximos volúmenes de agua almacenada en presas justo en los años abundantes con el fin de abastecer mayores superficies o brindar el servicio a más productores lo cual repercute de manera negativa en los años posteriores (Mejía-Saénz *et al.*, 2001); además las redes de distribución de agua en los distritos de riego se ven afectadas por la carencia de infraestructura y la mala organización de los usuarios, favoreciendo las pérdidas operativas en la red (Mejía-Saénz *et al.*, 2001); al mismo tiempo se suman las prácticas deficientes en el manejo del agua a nivel parcelario propiciando una baja eficiencia global del manejo del agua (CONAGUA, 2018a).

### **3.3. Distritos de riego (DR) y unidades de riego (UR) en México**

Los DR son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal desde 1926, incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos, entre otros (CONAGUA, 2018b). El agua empleada

en los distritos de riego se aprovecha por gravedad o por bombeo, siendo la fuente superficial una presa, derivación o bombeo directo de la corriente; en tanto que la fuente subterránea se aprovecha a través del bombeo de pozos (CONAGUA, 2018a). Los distritos de riego se encuentran localizados en casi todas las entidades federativas del país, con excepción de Campeche, Ciudad de México y Tabasco; por otra parte, las UR son áreas agrícolas con infraestructura y sistemas de riego distintas de los distritos de riego y por lo general de menor superficie. Pueden integrarse por asociaciones de usuarios u otras figuras de productores organizados, que se asocian entre sí para prestar el servicio de riego con sistemas de gestión autónoma y operar las obras de infraestructura hidráulica para la captación, derivación, conducción, regulación, distribución y desalojo de las aguas nacionales destinadas al riego agrícola. Un dato revelador sobre la importancia de las UR en el país en el año agrícola 2016-2017, se cosechó una superficie del orden de 3.6 millones de hectáreas (CONAGUA, 2018b).

### **3.3.1. Unidades de riego en el estado de Zacatecas**

El estado de Zacatecas cuenta con al menos 221,725.92 hectáreas de unidades de riego que están distribuidas al centro, y sur del estado. Los principales municipios que cuentan con mayor superficie de unidades de riego son Fresnillo, Villa de Cos, Pánuco, Pinos, y Jalpa; los cuales suman el 47 % de la superficie sembrada en 2018 (SIAP, 2019).

### **3.4. Evapotranspiración (ET)**

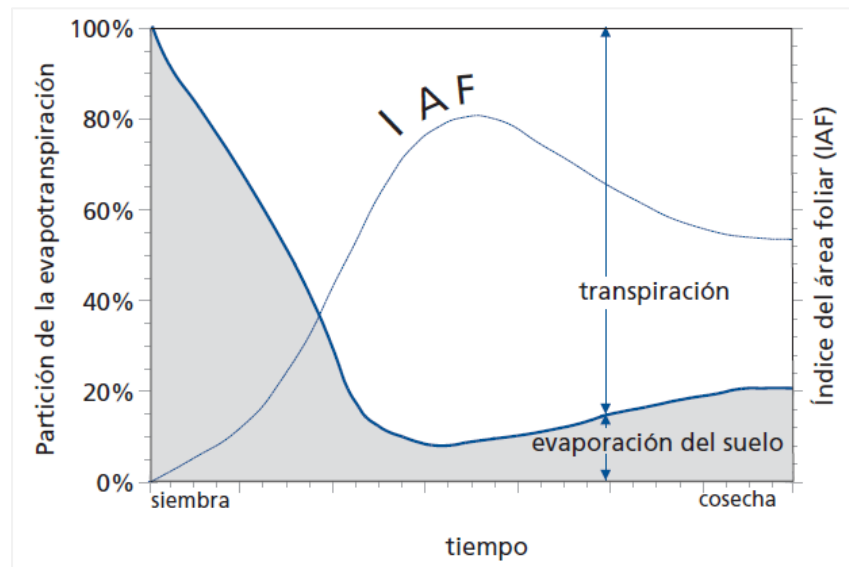
La evapotranspiración es un proceso importante en el balance energético y el ciclo hidrológico (Shi *et al.*, 2017), es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen *et al.*, 1998). La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. En la Figura 1 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100 % de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90 % de la ET ocurre como transpiración (Allen *et al.*, 1998).

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la ET (Figura 2). Los principales parámetros climáticos que afectan la ET son la

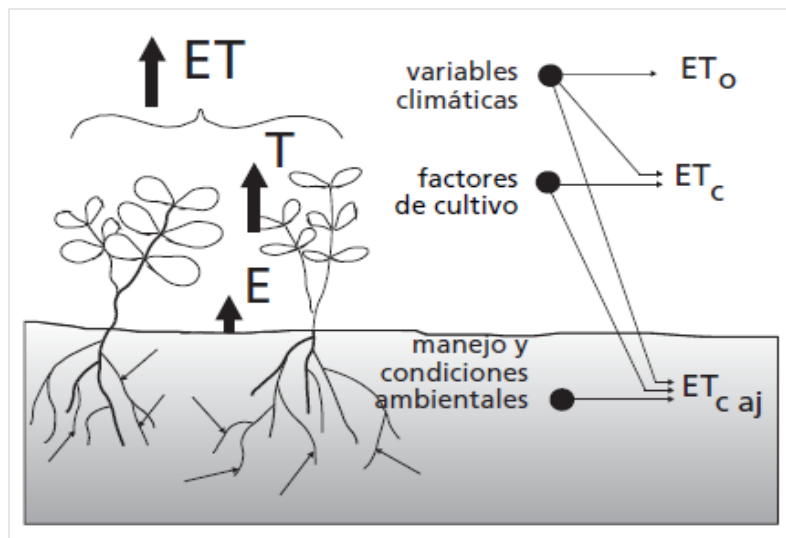
radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento; los factores de cultivo que deben tomarse cuando se evalúa la ET son el tipo de cultivo, variedad, etapa de desarrollo, altura del cultivo, la rugosidad y las características radiculares del cultivo, y finalmente los parámetros del manejo y condiciones ambientales se toman en cuenta factores como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros, ausencia de control fitosanitario y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998).

### 3.4.1. Conceptos de Evapotranspiración

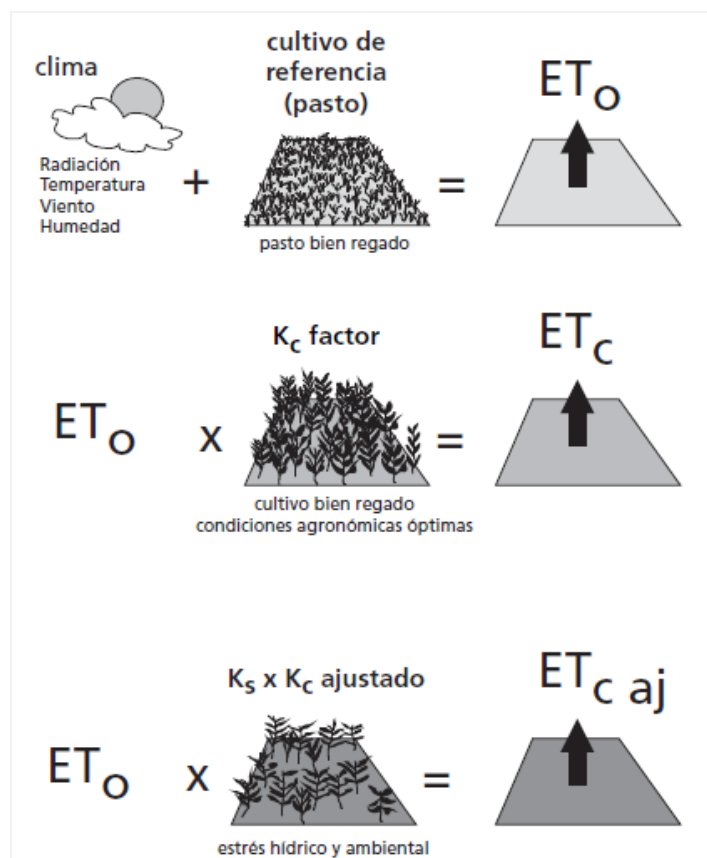
El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>c aj</sub>), de las cuales se describen a continuación en la Figura 3.



**Figura 1.** Representación de la evaporación y transpiración en el proceso de evapotranspiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual (Allen *et al.*, 1998).



**Figura 2.** Factores que afectan la evapotranspiración relacionados a conceptos de evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998).



**Figura 3.** Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ) (Allen *et al.*, 1998).

### ***Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>)***

Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con una altura de cultivo supuesta de 0.12 m, una resistencia de superficie fija de 70 s/m, y un albedo de 0.23, que se asemeja mucho a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, en crecimiento activo y sombreando completamente el suelo (Allen *et al.*, 1998).

Los factores que afectan ET<sub>o</sub> son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET<sub>o</sub> es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET<sub>o</sub> expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen *et al.*, 1998).

### ***Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>)***

Se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas (Allen *et al.*, 1998)

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. Las diferencias en la anatomía de las hojas, características de los estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas (Allen *et al.*, 1998).

### ***Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>c aj</sub>)***

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>c aj</sub>) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse por condiciones no óptimas, como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua (Allen *et al.*, 1998).

### ***Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia***

Existen varios métodos para medir la evapotranspiración de los cultivos, como los métodos de balance de energía, los métodos de balance de agua del suelo y los métodos de evaporación panorámica. Sin embargo, la evapotranspiración de los cultivos no es fácil de medir, ya que depende de los parámetros del clima, el tipo de cultivo, el tipo de suelo y el manejo agrícola, por lo tanto, no es sencillo elegir un método.

La estimación precisa de ETo es necesaria para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, así como para aumentar la producción de los agricultores (Droogers y Allen, [2002](#)). En los últimos 50 años, se han desarrollado numerosos métodos para calcular la ETo, de acuerdo con las condiciones climáticas y los datos meteorológicos.

### **3.5. Productividad del agua**

En 1997, Molden introdujo el término de productividad del agua (WP), para el análisis del uso del agua en diferentes niveles de agregación, en resumen, es una relación que se refiere a la unidad de salida por unidad de entrada, más tarde Kijne, Barker & Molden (2003) establecieron el concepto como una medida para analizar la capacidad de los sistemas agrícolas de convertir el agua en alimento. Sin embargo, este concepto en la actualidad es empleado en la práctica como una herramienta para diagnosticar la eficiencia del uso del agua y para brindar oportunidades de redistribución de agua en las cuencas, donde el objetivo sea el incremento de la productividad agrícola del agua, obteniéndose el modelo matemático para determinar la productividad del agua:

$$WP = \frac{\text{Cantidad de producto (físico, social o económico)}}{\text{Unidad de agua}} \quad (2)$$

El producto generado puede ser expresado en diferentes términos: físico o económico o social, es decir, el enfoque del llamado cultivo por gota o productividad física del agua, el cual se refiere a la cantidad de producto agrícola obtenido por unidad de agua empleado (FAO, 2003).

El desarrollo de herramientas efectivas para medir el WP es de suma importancia para los medios y mejorar los beneficios derivados de los recursos hídricos. En algunas ocasiones, los beneficios del agua agrícola se evalúan a nivel local en términos de beneficios directos relacionados con la productividad de los cultivos generados (Molden *et al.*, 1998) o a nivel nacional, con beneficios agregados relacionados con la producción.

Besseminder *et al.* (2005) sugieren algunos datos relevantes requeridos, tales como: producto cosechado y biomasa total (sobre el suelo), contenido de materia seca del producto cosechado, fechas de etapas de cultivo, fechas de siembra y cosecha, ubicación y/o año.

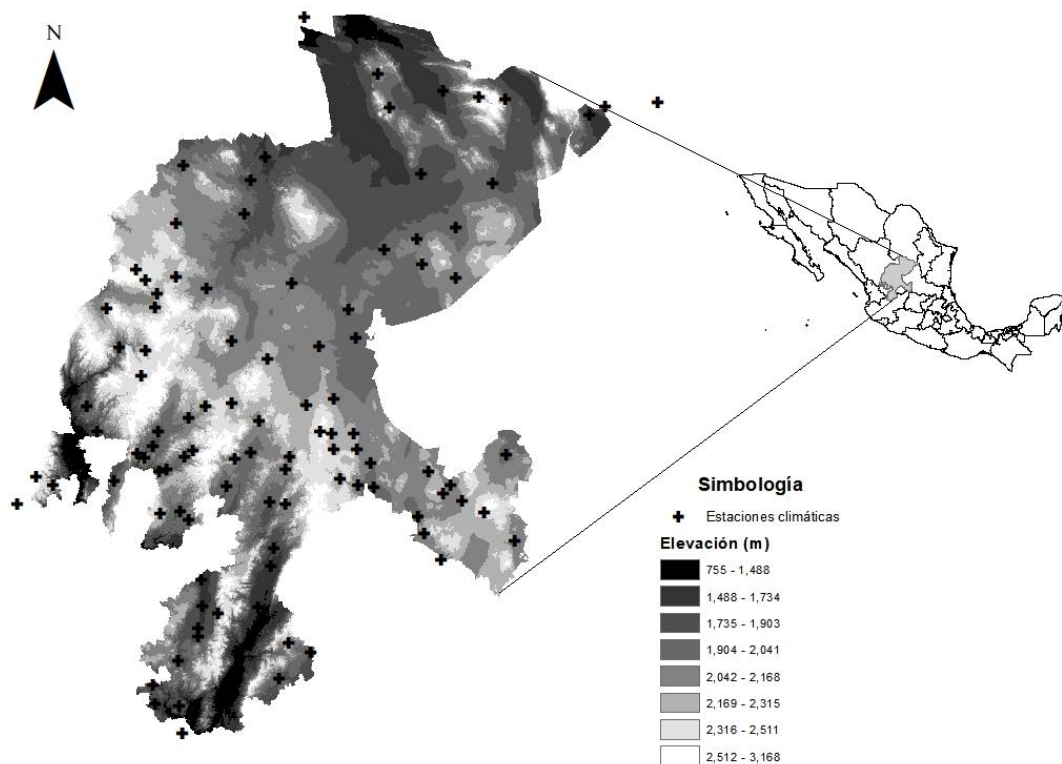
Actualmente se encuentran pocos datos disponibles sobre WP de cultivos que se miden bajo las condiciones de gestión de los campos de los agricultores. Esto se debe principalmente a las dificultades e incertidumbres de la medición del volumen de agua aplicada por los agricultores en cada evento de riego (Heydari, 2014).

Para mejorar el WP agrícola, primero deben identificarse las fuentes de ineficiencias y los principales factores y parámetros que conducen a valores bajos de WP. Basado en Kassam *et al.* (2007), la investigación de la mejora del rendimiento (incluida la mejora genética y el manejo de los cultivos y los recursos naturales) ha hecho una contribución importante a los aumentos globales de WP agrícola durante las últimas cinco décadas más o menos.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Ubicación

Zacatecas tiene una extensión territorial de 75,284 km<sup>2</sup>, esto representa el 3.8% del territorio nacional. Se localiza entre las coordenadas 25° 07' y 21° 02' de latitud norte, y 100°44' y 104° 21' de longitud oeste. Limita al norte con Durango y Coahuila de Zaragoza; al este con Coahuila de Zaragoza, Nuevo León y San Luis Potosí; al sur con Guanajuato, Jalisco y Aguascalientes; al oeste con Jalisco, Nayarit y Durango (Figura 4). El clima es principalmente semiseco templado, con una temperatura media anual de 18 °C y variaciones promedio de 35 °C máxima y 6 °C mínima; la precipitación pluvial media anual es de 510 mm.



**Figura 4.** Mapa de localización.

### 4.2. Datos climáticos

Los datos diarios de precipitación (PP), temperatura máxima ( $T_{\max}$ ), mínima ( $T_{\min}$ ) y media ( $T_{\text{med}}$ ) fueron proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) de 108

estaciones climáticas dentro del periodo de estudio (1981 a 2010); 103 estaciones pertenecientes al estado de Zacatecas y 5 estaciones más de estados aledaños (Jalisco, Nuevo León y Coahuila). La información y ubicación de las estaciones se muestra en el Anexo 2.

El criterio de selección de estaciones fue de acuerdo con lo establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011) el cual establece el uso de estaciones con al menos el 80 % de datos disponibles y no falten valores mayores a 3 años consecutivos. Las bases de datos pueden tener errores que podrían producir resultados poco confiables al no ser detectados; algunos errores se atribuyen a los instrumentos, al observador, al transmitir los datos, la introducción de datos en el teclado y su validación, por lo tanto, las bases de datos se sometieron a un control de calidad y homogenización de los datos climáticos.

#### **4.3. Elaboración de un Sistema de Información Geográfico**

Los datos vectoriales empleados para el estudio fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) y del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en formato shapefile (shp) a escalas de 1:1,000,000 y 1:250,000. Los datos vectoriales fueron analizados con el software libre de código abierto Quantum GIS (QGIS), versión 3.4.10., desarrollado por QGIS Development Team (Lakota and Stajnko, 2013; QGIS, 2017). La información de las cartas vectoriales se muestra en el Anexo 1.

Posteriormente se elaboró una base de datos de los archivos vectoriales en un Sistema de Coordenadas Proyectadas UTM 1984, en la zona 13N de características hidrológicas, edafológicas, uso de suelo y vegetación, cuencas hidrológicas y subcuencas

#### **4.4. Caracterización agrícola del estado de Zacatecas**

Se realizó una caracterización de la agricultura por modalidad y ciclo agrícola de superficie sembrada, cosechada y siniestrada, producción, rendimiento y valor de la producción del estado de Zacatecas, además un análisis de los principales municipios con mayor superficie en unidades de riego empleando datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para el periodo que comprende de 2003 a 2018.

#### **4.5. Análisis espacio-temporal de las estaciones climáticas del estado de Zacatecas**

Para el análisis temporal se emplearon registros de series mensuales, anuales y meses con registros extremos de PP,  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$ , posteriormente se hizo una prueba paramétrica de dispersión para identificar las tendencias lineales en las series de tiempo. En cuanto al análisis espacial, se calcularon las medias mensuales y anuales de las mismas variables para cada estación climática. Además, se realizó una interpolación mensual y anual de PP,  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$  con el método distancia inversa ponderada (IDW) con un tamaño de celda de 30 m. A partir de la interpolación creada se convirtió el archivo a formato raster.

#### 4.6. Estimación de los valores de evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) mediante métodos empíricos

En el Cuadro 1 se muestran los métodos empíricos empleados para la estimación de ET<sub>0</sub> en el estado de Zacatecas. Se analizaron 6 modelos empíricos basados en radiación y temperatura, los cuales fueron comparados con el método estándar FAO 56 Penman-Monteith (Anexo 3).

**Cuadro 1.** Métodos para estimar ET<sub>0</sub>.

Método	Modelo empírico	Autor
Hargreaves-Samani	$ET_o = 0.0023R_a(T_{med} - 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$	Hargreaves y Samani (1985)
Turc	$ET_o = (0.3107 * R_s + 0.65) * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15}\right)$	Turc (1962)
Thornthwaite	$ET_{men} = 16\left(\frac{10 T_{med}}{I}\right)^a$	Thornthwaite (1948)
Priestley-Taylor	$ET_o = \alpha/\lambda \Delta/(\Delta + \gamma)(R_n - G)$	Priestley y Taylor (1972)
Makkink-Hansen	$ET_o = 0.7\Delta/(\Delta + \gamma)R_s/\lambda$	Hansen (1984)
Blaney-Criddle	$ET_o = \alpha + b[P(0.46 T_{med} + 8.13)]$	Doorenboss y Pruitt (1977)
FAO 56 Penman-Monteith	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	Allen et al (1998)

Dónde:  $R_s$  es radiación solar,  $R_n$  es radiación neta,  $R_a$  es radiación extraterrestre,  $G$  es flujo de calor del suelo,  $T_{\max}$  es temperatura máxima,  $T_{\min}$  es temperatura mínima,  $T_{med}$  es temperatura media,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor,  $\gamma$  es la constante psicrométrica,  $a$  y  $b$  coeficientes.

Una de las problemáticas a las que se enfrentan en la actualidad es que las estaciones climáticas no cuentan con todas las variables requeridas para este tipo de análisis, por lo tanto se calculó la humedad relativa (HR) por el método recomendado por Eccel (2012) empleando datos diarios de  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  y  $T_{\text{med}}$  de tres estaciones agroclimáticas de INIFAP de los años 2018 y 2019 (único registro en la plataforma web) mismas que fueron seleccionadas aleatoriamente en los extremos del estado. Por otra parte, la velocidad del viento (U) se consideró con datos promedio mensuales de cada estación agroclimática INIFAP de los últimos 2 años de registro.

#### 4.6.1. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA), pruebas de comparación múltiple de medias por el método de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) y coeficiente de determinación ( $R^2$ ) en la librería ANOVA1 incluida en el software R (R Development Core Team, 2018).

#### 4.7. Estimación de la productividad del agua (WP)

Los cultivos analizados en el estudio fueron maíz grano, chile mirasol y frijol, característicos por contar con mayor superficie sembrada durante el periodo 2003-2018 en el ciclo primavera-verano bajo la modalidad de riego de la zona de estudio.

##### 4.7.1. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc)

Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo se emplearon datos de evapotranspiración de referencia (ET0) por el método Hargreaves-Samani (1985) en el periodo que comprende 2003 a 2010. La ETc se determinó de la siguiente manera (Allen *et al.*, 1998):

$$ETc = Kc * ET0 \quad (3)$$

Donde:

**ETc:** Evapotranspiración del cultivo (mm/día-1)

**Kc:** Coeficiente del cultivo

**ETo:** Evapotranspiración de referencia (mm/día)

La fecha de siembra y la fecha de ajuste de los cultivos se muestran en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Fechas de siembra y duración del ciclo para el cultivo de maíz, chile y frijol en el ciclo primavera-verano (SAGARPA, 2015; INIFAP, 2006; INIFAP, 2003).

<b>Cultivo</b>	<b>Fechas de siembra</b>	<b>Ajuste fecha de siembra</b>	<b>Duración del ciclo (días)</b>
Maíz grano	20 abr-24 may	07-may	150
Chile mirasol	15 abr-10 may	28-abr	96
Frijol	25 mar-25 abr	31-mar	96

La duración de las fases fenológicas y los coeficientes del cultivo (Kc) se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Duración fenológica y coeficientes de cultivo (Kc), (INIFAP, 2006; Allen *et al.* 1998).

<b>Cultivo</b>	<b>Duración de la Fase (días)</b>				<b>Kc</b>	<b>Kc</b>	<b>Kc</b>
	<b>ini</b>	<b>des</b>	<b>med</b>	<b>fin</b>	<b>ini</b>	<b>med</b>	<b>final</b>
Maíz grano	30	40	50	30	0.7	1.2	0.6
Chile mirasol	40	45	50	25	0.6	1	0.8
Frijol	20	30	32	14	0.4	1.1	0.55

Donde “ini” es inial, “des” es desarrollo, “med” es media y “fin” es final.

Los datos de evapotranspiración del cultivo por estación climática se interpolaron a través con el método distancia ponderada inversa (IDW), con tamaño de celda de 30 con el software QGIS versión 3.10.4. Después se calculó las estadísticas zonales de los municipios del estado a partir del raster de entrada de ETc, calculando la ETc máxima, mínima, media y desviación estándar, finalmente fue unida la tabla de atributos que contenía la información de ETc a la carta vectorial de municipios.

#### **4.7.2. Cálculo de la productividad del agua del cultivo (WP)**

Se emplearon datos promedio del rendimiento del cultivo de maíz grano, frijol y chile mirasol por municipio que fueron proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en el periodo de estudio 2003 a 2010 (Anexo 4). Los

datos de rendimiento de cultivos se unieron a capa vectorial de municipios en formato *shapefile* para el cálculo de la productividad del agua.

La productividad del agua del cultivo se determinó con la formula recomendada por de Li Hongjun *et al.* (2008):

$$WP = \frac{Y}{10 * ETc_{acumulada}} \quad (4)$$

Donde:

**WP:** Productividad de agua del cultivo ( $\text{kg/m}^{-3}$ )

**Y:** Rendimiento de cultivo ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

**ETC<sub>acumulada</sub>:** Evapotranspiración del cultivo acumulada (siembra-cosecha) (mm).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Sistema de Información Geográfico

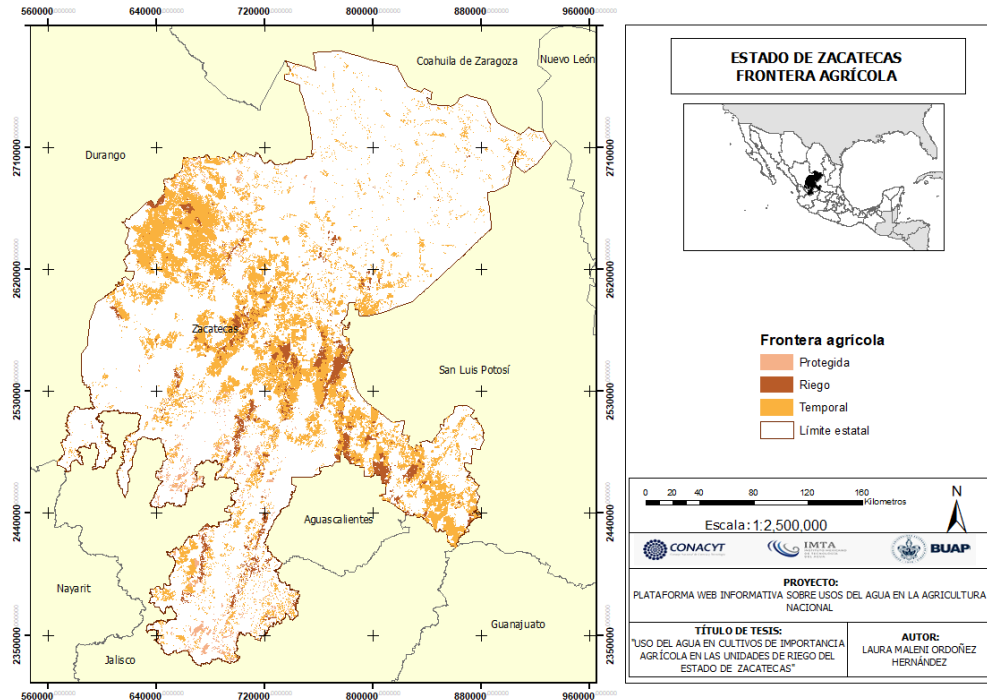
Zacatecas pertenece a un conjunto de Regiones Hidrológicas (RH), las cuales son: El Salado, Lerma-Santiago, Nazas Aguanaval y Presidio San Pablo, de las cuales la RH “El Salado” y “Nazas Aguanaval” ocupan aproximadamente el 70 % de la superficie total del estado. En cuanto a las Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), se concentran cuatro en el estado y son Cuencas Centrales del Norte, Lerma-Santiago Pacífico, Pacífico Norte y Río Bravo; cabe mencionar que “Cuencas Centrales del Norte” y “Lerma-Santiago Pacífico” se encuentran en casi toda la totalidad del estado. También el estado cuenta con 63 acuíferos y 37 cuencas hidrológicas. A su vez, el estado cuenta con el Distrito de Riego (DR) 034 y concesiones de Unidades de Riego (UR), esta última se concentra en la región centro, este y sur del estado. En cuanto al perfil del suelo, en el estado se encuentra con mayor proporción de suelo de tipo “xerosol”, y se distribuye en la región este, noreste y ligeramente al norte del estado, también se presenta el tipo de suelo “litosol” al norte del estado y en la región sur se encuentran “feozem,” y “yermosol”.

El clima más predominante en el estado es semiseco templado y seco templado y se presenta el centro, este y norte del estado, en la región sur el clima más predominante es templado subhúmedo y semifrío subhúmedo. La distribución de estaciones climatológicas se presenta en la totalidad del estado, con mayor presencia de estaciones en la región centro-sur del estado. Actualmente se cuentan con 168 estaciones. La precipitación media anual en el estado es de 510 mm, la cual no se distribuye de manera homogénea en toda la superficie del estado, las regiones con mayores volúmenes de precipitación es la suroeste, con volúmenes de hasta 384 mm anuales, según información de INEGI, en la región centro-norte la precipitación anual es de 80 a 200 mm (Anexo 1).

### 5.2. Caracterización agrícola del estado de Zacatecas

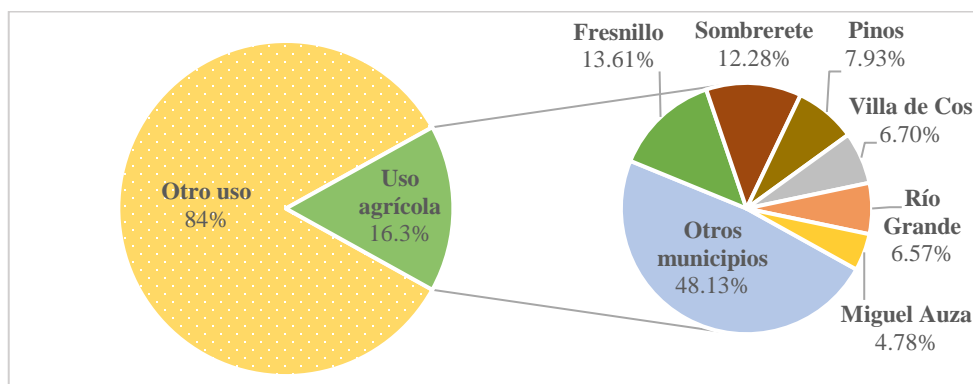
#### 5.2.1. Características de la agricultura en el estado de Zacatecas

El estado de Zacatecas es una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana, posee 58 municipios, de los cuales en 2018 se cultivaron 1,218,268.04 ha (SIAP, 2019); la Figura 5 muestra la distribución de la superficie según la modalidad de cultivo (riego y temporal).



**Figura 5.** Distribución de la superficie agrícola en el estado de Zacatecas según la modalidad (SIAP, 2017a).

La mayor superficie de agricultura de temporal se desarrolla al noroeste, centro y sur del estado, por otra parte, la agricultura de riego se ubica al centro y sur. Los municipios que concentran mayor superficie agrícola corresponden a Fresnillo, Pinos, Miguel Auza, Río Grande, Sombrerete y Villa de Cos que en comunión aportan el 51.87 % de la superficie cultivada (Figura 6).



**Figura 6.** Superficie cultivada por municipios en el estado de Zacatecas en el año 2018 (SIAP, 2019).

En el Cuadro 4 se muestra las características generales de la agricultura en el estado de Zacatecas, donde se sembraron alrededor de 84 cultivos en 3 ciclos agrícolas: otoño-invierno (OI), primavera-verano (PV) y perennes (PER), bajo modalidades de riego y temporal. El estado de Zacatecas cuenta con más de 1.2 millones de hectáreas de cultivo, de las cuales se obtiene una producción mayor a 7.2 millones de toneladas de productos agrícolas, generando más de 19 billones de pesos anuales tan solo en el año 2018 (SIAP, 2019).

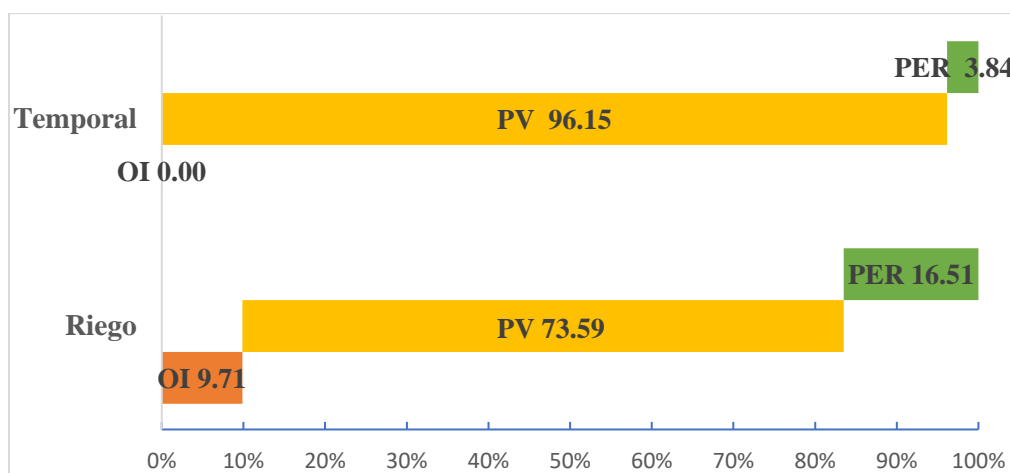
**Cuadro 4.** Características generales de la agricultura en el estado de Zacatecas (SIAP, 2019).

	<b>Unidad</b>	<b>OI</b>	<b>PV</b>	<b>PER</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Especies cultivadas</b>	Número	25	35	24	84
	%	29.76	41.67	28.57	-
<b>Sup. Sembrada</b>	Hectáreas	20,832.00	1,136,114.80	61,321.24	1,218,268.04
	%	1.71	93.26	5.03	-
<b>Producción</b>	Toneladas	398,039.55	4,809,400.00	2,079,413.57	7,286,853.12
	%	5.46	66	28.54	-
<b>Valor producción</b>	Miles \$	1,510,271.94	14,646,616.56	2,937,779.06	19,094,667.56
	%	7.91	76.71	15.39	-

El estado de Zacatecas es de gran importancia no solo por su producción agrícola, sino también por la superficie de riego que posee, en 2018, esta modalidad representó el 13.5 % de la superficie sembrada en la agricultura de riego y 86.6 % para la agricultura de temporal (SIAP, 2019).

La superficie cultivada en el estado de Zacatecas en el periodo de 2002 a 2018 corresponde mayormente al ciclo PV con 93.31 %, la superficie restante se distribuye entre los cultivos perennes con 5.44 % y los cultivos de OI con 1.25 %. La agricultura de riego ha tenido un importante auge en los ciclos PV y PER con 16.51 % y 73.59 % respectivamente (Figura 7),

en el caso de la agricultura de temporal se desarrolla casi en su totalidad en el ciclo PV con 96.15 %, ya que depende de la precipitación en los meses de mayo a octubre.

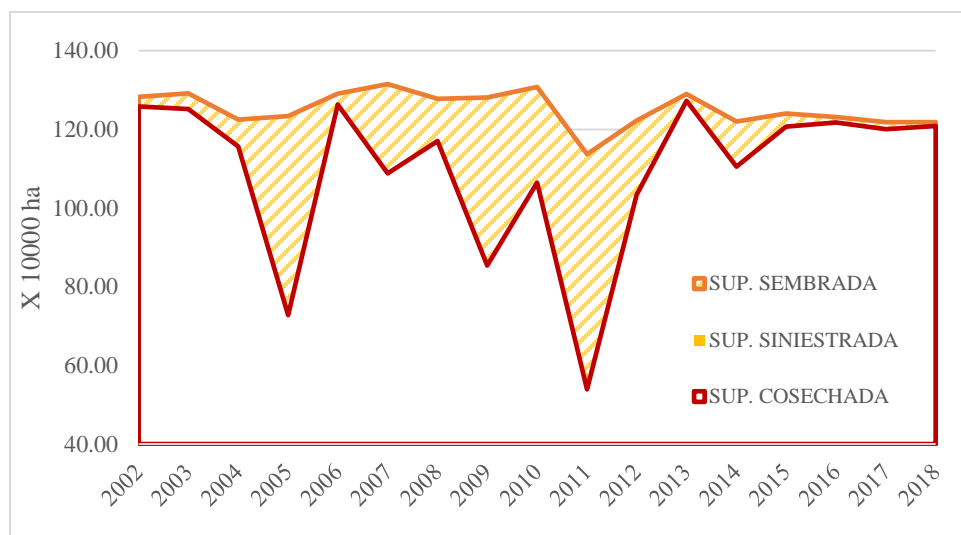


**Figura 7.** Distribución de la superficie sembrada según ciclo y modalidad de cultivo (SIAP, 2019).

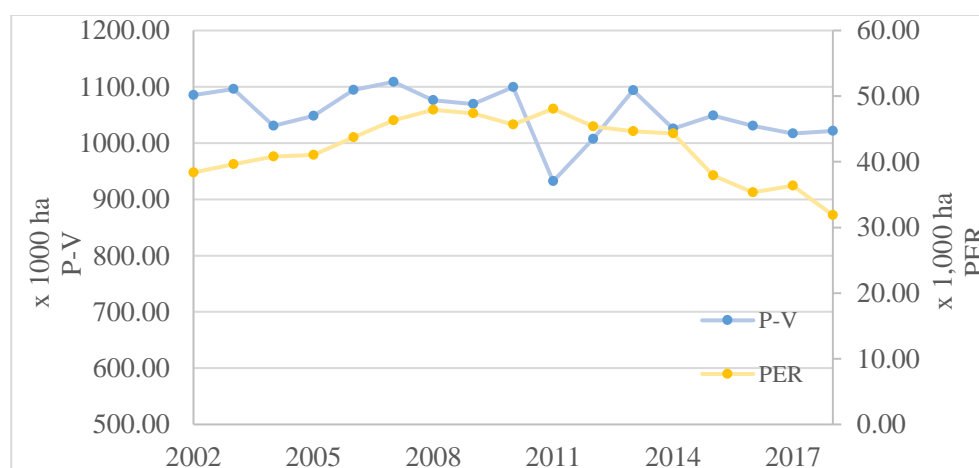
#### 5.2.1.1. Análisis de la superficie cultivada en el estado de Zacatecas

Los resultados obtenidos del análisis en la base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2019) se encontró que la superficie sembrada en el estado de Zacatecas disminuyó 6.4 % entre el periodo de 2002 al 2018 con un descenso anual promedio de 0.37 %, de la misma manera la superficie cosechada presentó una importante reducción en los años 2005, 2009 y 2011; los registros del SIAP (2019) indican que la mayor superficie siniestrada se reportó en el año 2005 y 2011 con pérdidas de 41 % y 52.6 % respectivamente de la superficie sembrada (Figura 8). Lo anterior indica una alta siniestralidad de la agricultura de temporal del estado de Zacatecas.

La evolución en la modalidad de temporal de la superficie agrícola según ciclo de cultivo desde 2002 a 2018 se muestra en la Figura 9, donde la superficie sembrada en PV osciló entre 1.085 a 1.021 millones de hectáreas, en el ciclo PER entre 38 a 31 mil hectáreas y en el caso de OI no se cuentan con registros, sino hasta el año 2017 con 753 hectáreas, esto corresponde a una disminución anual promedio de 0.06 % en los 3 ciclos de cultivo.

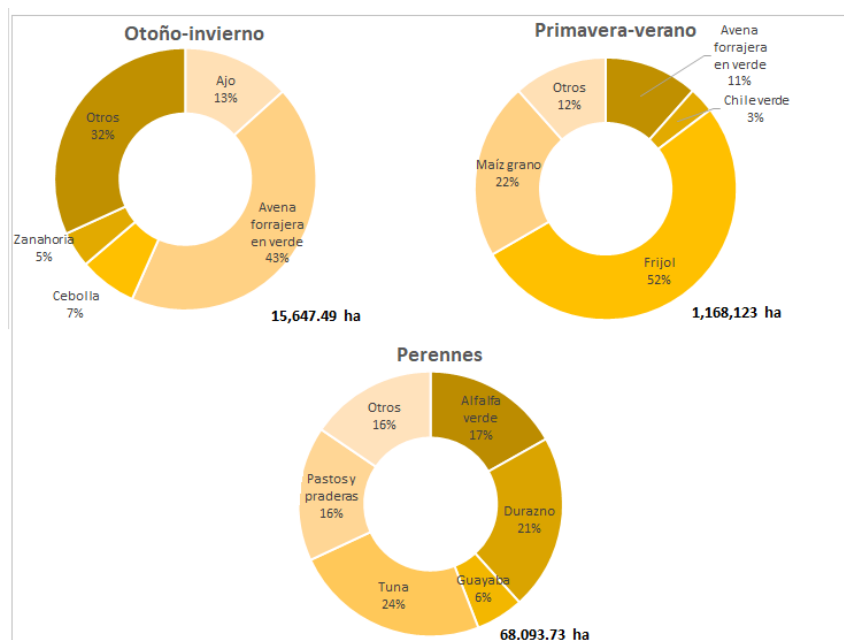


**Figura 8.** Evolución de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada del estado de Zacatecas en el periodo 2003-2018 (SIAP, 2019).



**Figura 9.** Evolución de la superficie según ciclo de cultivo (SIAP, 2019).

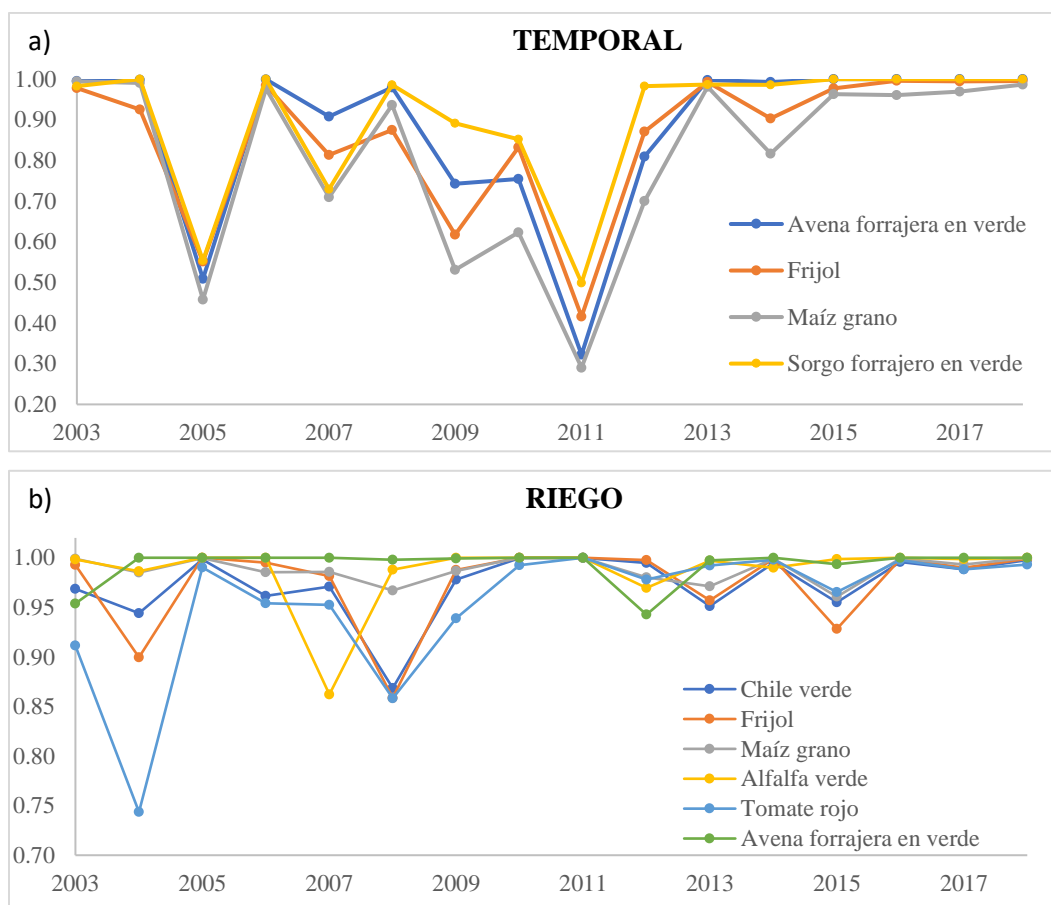
La distribución de los cultivos en el estado varía según el ciclo, en la Figura 10 se muestra la distribución porcentual de los principales cultivos sembrados por cada ciclo para el periodo 2002-2018, en el ciclo OI predomina el cultivo de avena forrajera en verde (43 %) y ajo (13 %), en el caso del ciclo PV los cultivos con mayor superficie cultivada es el frijol (52 %) y maíz de grano (22 %) mientras que en el ciclo PER predomina la tuna (24 %), el durazno (21 %) y alfalfa (17 %).



**Figura 10.** Distribución promedio de los principales cultivos por ciclo agrícola del estado de Zacatecas en el periodo 2003-2018 (SIAP, 2019).

La relación de superficie cosechada/sembrada (CS) es un indicador de la productividad de los cultivos, la evolución de este indicador para cada modalidad de cultivo en el periodo de 2002 a 2018 se muestra en la Figura 11 a y b. Los cultivos de temporal mostraron una reducción en la relación CS en el año 2005 y 2011 ocasionada por la helada del primer trimestre de ese año (CONAGUA, 2011); entre los más afectados por este fenómeno fue el cultivo de maíz grano, avena forrajera en verde, frijol y sorgo forrajero en verde. Los cultivos de temporal al ser más sensibles a los fenómenos extremos como sequías muestran mayor variabilidad en la superficie cosechada lo que se refleja en los valores de CS, este parámetro es más estable en la modalidad de riego. Puesto que los valores de CS indican que la

productividad se mantuvo estable para todos los cultivos, a excepción del cultivo de tomate rojo, mostrando un descenso en 2004, en este caso el incremento en la superficie sembrada no asegura un incremento de la superficie cosechada, incluso diferentes factores afectan el rendimiento y producción, tales como el control de plagas y enfermedades, la tecnología utilizada y el sistema empleado (campo abierto o invernadero). Por otra parte, el efecto de la helada en 2011 no fue devastador comparado con los cultivos de temporal.



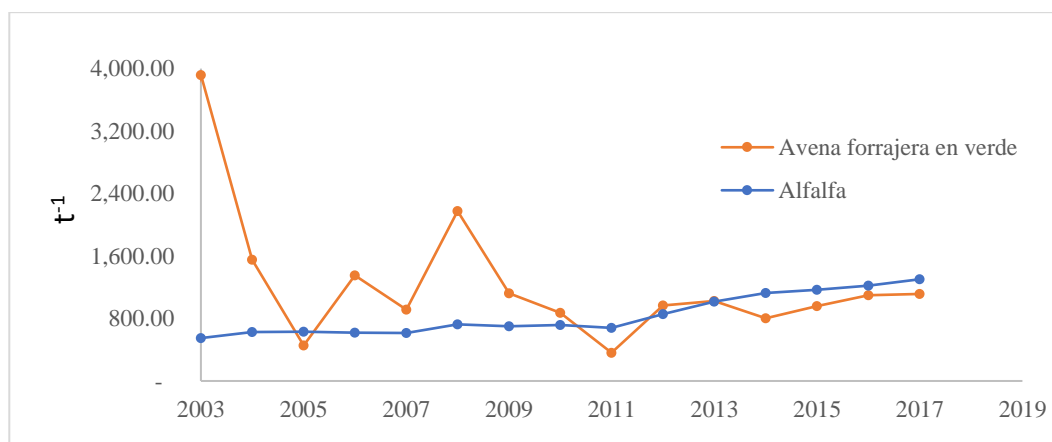
**Figura 11.** Evolución de la relación entre superficie cosechada/sembrada (CS) de los principales cultivos para cada modalidad, a) modalidad de temporal y b) modalidad de riego (SIAP, 2019).

### 5.2.1.2. Producción agrícola del estado de Zacatecas

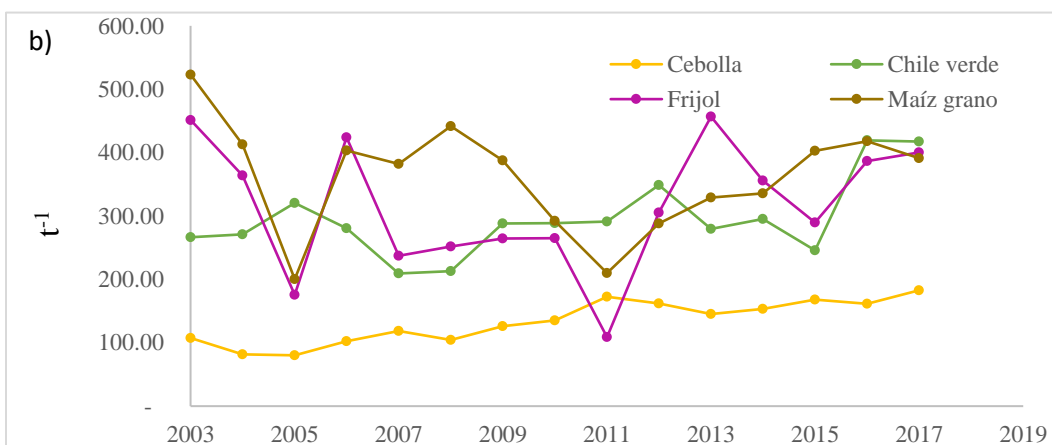
La cantidad de la producción agrícola en el estado de Zacatecas varía según el cultivo, la Figura 12 (a y b) muestra la evolución anual del volumen de producción de los principales cultivos en el periodo 2003-2018, a nivel estado se observa que cultivos como cebolla, chile

verde y alfalfa han registrado un ligero crecimiento en la producción mientras que desde 2003 a 2010 los demás cultivos sufrieron una caída en el año 2011 en especial en los cultivos de avena forrajera, frijol y maíz de grano (a y b) a causa de la primera helada del primer trimestre de ese año (CONAGUA, 2011).

a)



b)



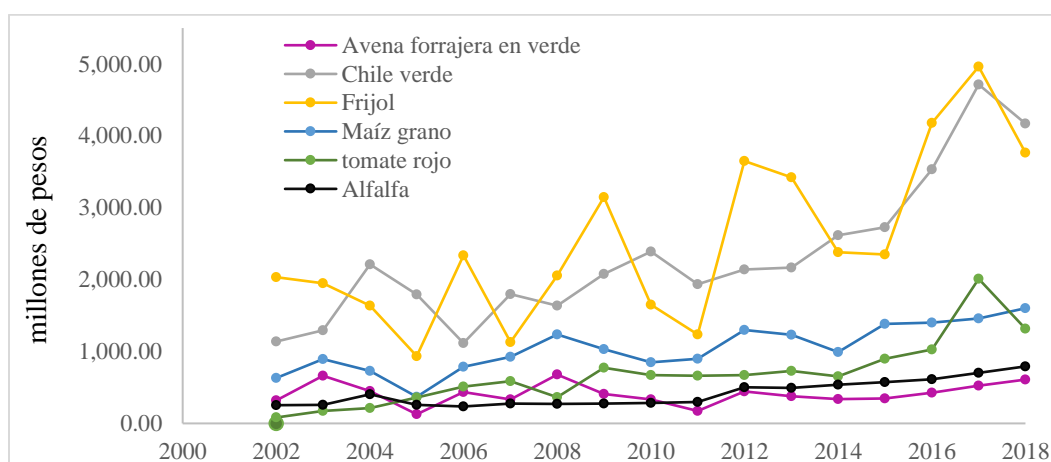
**Figura 12.** Evolución del volumen de producción de los principales cultivos en el estado de Zacatecas. a) producción avena forrajera en verde y cultivo de alfalfa. b) producción de cebolla, frijol, chile verde y maíz de grano (SIAP, 2019).

La producción de avena forrajera fue superior a 1.5 millones de toneladas en el año 2002, alcanzando su máximo volumen al siguiente año con 3.9 millones de toneladas (Figura 12a), posteriormente sufrió caídas drásticas de 0.4 y 0.3 millones de toneladas en los años 2005 y 2011 respectivamente, a partir de ese año la cantidad producida se mantiene con un ligero crecimiento. Del mismo modo, el cultivo de alfalfa ha presentado un crecimiento constante

desde 2003 con una producción de 0.6 millones de toneladas al año 2018 registrando una producción de 1.3 millones de toneladas.

### 5.2.1.3. Valor económico de la producción en el estado de Zacatecas

El valor generado por los cultivos agrícolas en el estado creció de 5.8 mil millones de pesos en 2002 a 19 mil millones de pesos en 2018, destacando la contribución económica del cultivo de frijol y chile verde con más de 3.7 y 4.1 mil millones de pesos respectivamente en 2018 (Figura 13).

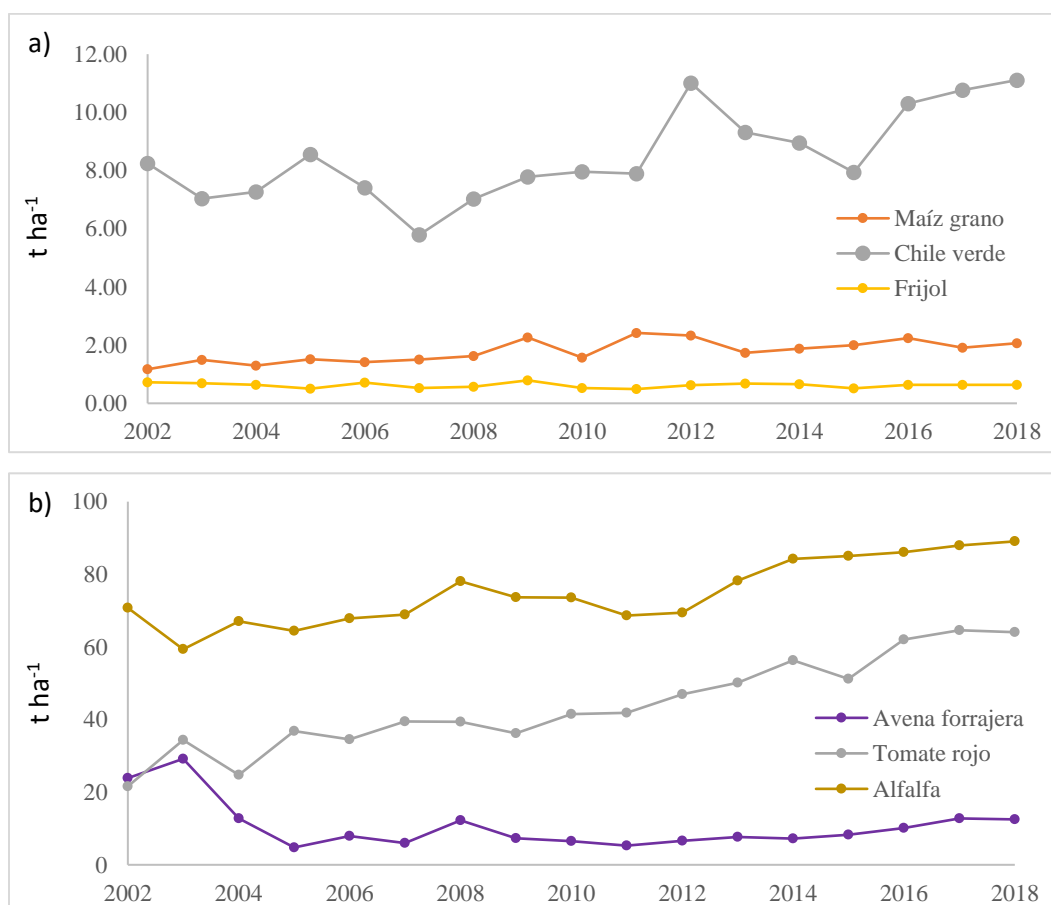


**Figura 13.** Valor de producción de los principales cultivos en el estado de Zacatecas (SIAP, 2019).

Por su alto valor económico merece especial atención el cultivo de frijol, cuyo aporte económico representa el 19.71 % del ingreso total generado en 2018 (SIAP, 2019), aportando en 2002 una cantidad de 2,000 millones de pesos, ascendiendo a 3,764 millones en 2018 y registrando caídas a 1,000 millones en los años 2005 y 2011, sin embargo, ha logrado recuperarse en los años posteriores. En cuanto al rendimiento, el cultivo de frijol se ha mantenido estable con un rendimiento promedio de  $0.6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; en la Figura 14 se muestra la evolución del rendimiento en el periodo 2002-2018 con modalidad de temporal y riego.

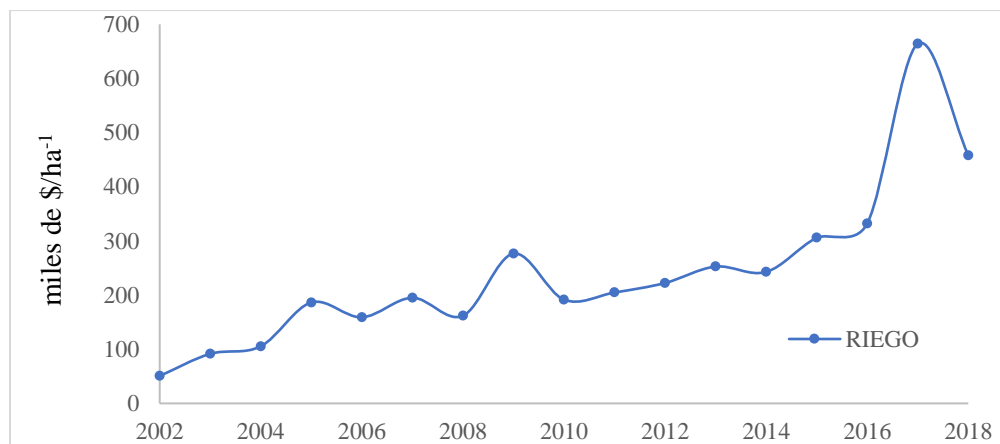
Otro caso particular es el aporte económico que ha tenido el cultivo de chile, registrando 1,000 millones de pesos en 2002 hasta ascender a 4,170 millones de pesos en 2018, además la evolución en el rendimiento es notable, en 2002 registró  $70.7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  y actualmente en 2008

ascendió a 89 t ha<sup>-1</sup> (Figura 14), la evolución que ha tenido en cuanto al rendimiento entre el periodo de 2002 a 2018, incrementó de 21 t ha<sup>-1</sup> en 2002 hasta a 64 t ha<sup>-1</sup> en 2018.



**Figura 14.** Evolución del rendimiento de cultivo del estado de Zacatecas en el periodo 2002-2018. a) maíz de grano, chile verde y frijol, b) avena forrajera en verde, tomate rojo y alfalfa (SIAP, 2019).

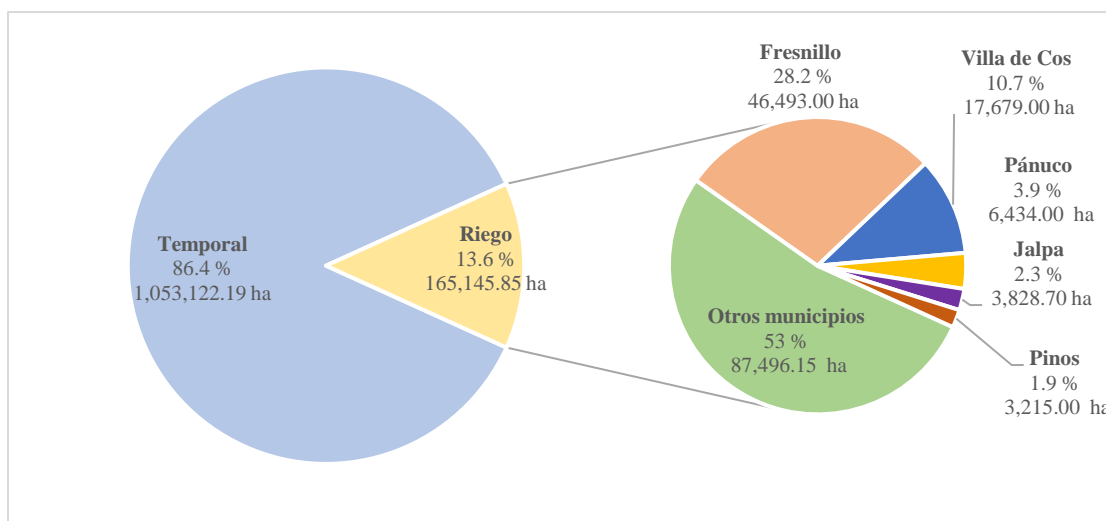
El cultivo de alfalfa tuvo un crecimiento promedio anual de 1.25%, iniciando en 2002 con 72 t ha<sup>-1</sup> y en 2018 registró cifras de hasta 92 t ha<sup>-1</sup>; la evolución del valor de la producción por hectárea sembrada para el cultivo de tomate rojo en la modalidad de riego se encuentra en la Figura 15. El valor de la producción por hectárea sembrada aumentó de 2002 a 2018 con un incremento promedio anual de 21 % (\$50.7 a \$450 por ha<sup>-1</sup>) en el periodo de estudio (2002-2018).



**Figura 15.** Evolución del valor de producción por hectárea sembrada de tomate rojo bajo riego (SIAP, 2019).

### 5.2.2. Características de la agricultura en los principales municipios con unidades de riego en el estado de Zacatecas

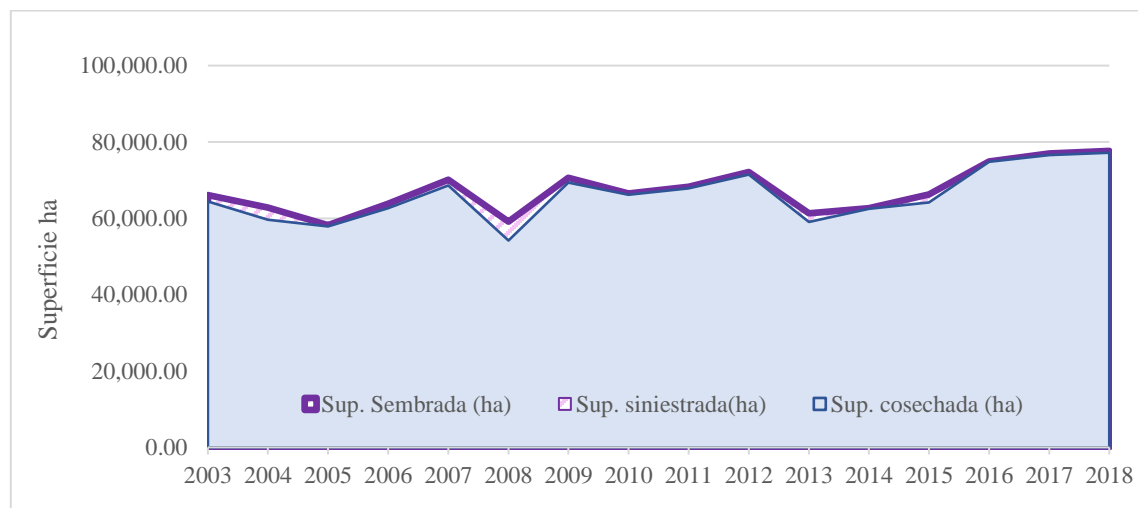
El estado de Zacatecas cuenta con al menos 221,725.92 hectáreas de unidades de riego que están distribuidas al centro, y sur del estado. Los principales municipios que cuentan con mayor superficie de unidades de riego son Fresnillo, Pinos, Villa de Cos, Pánuco y Jalpa (Figura 16) los cuales suman el 47 % de la superficie sembrada en 2018 (SIAP, 2019).



**Figura 16.** Superficie sembrada de los principales municipios con unidades de riego en el estado de Zacatecas en el año 2018 (SIAP, 2019).

### 5.2.2.1. Análisis de la superficie cultivada en los principales municipios con mayor superficie de unidades de riego

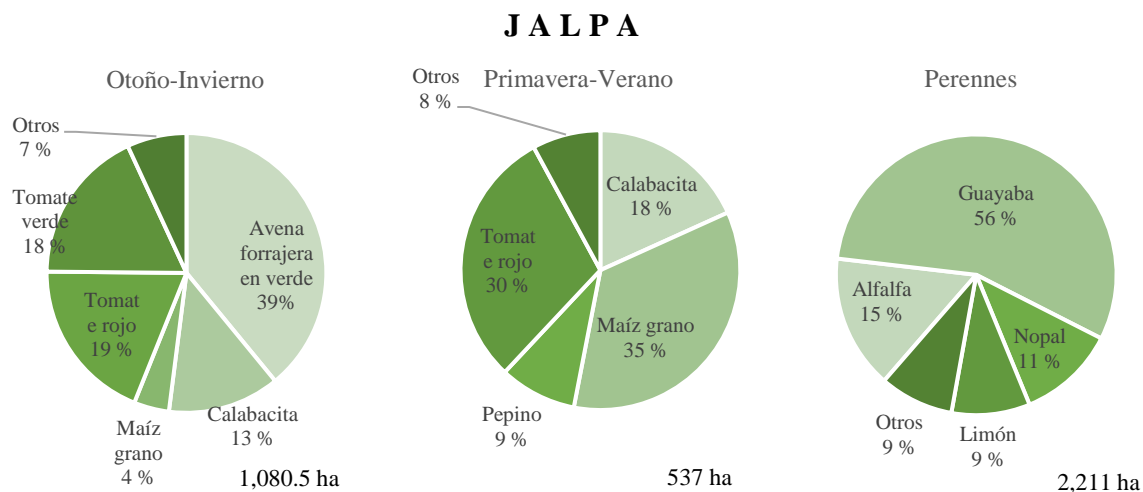
Los municipios con mayor superficie de unidades de riego son Jalpa, Fresnillo, Pánuco, Pinos y Villa de Cos, la superficie sembrada y cosechada incrementó un 2 % entre el periodo 2003 a 2018, registrando una ligera pérdida en el año 2008 de 4 mil ha<sup>-1</sup> (Figura 17). La superficie siniestrada es casi inapreciable en estos municipios.



**Figura 17.** Evolución de la superficie sembrada, cosechada y siniestrada de los municipios en conjunto (Jalpa, Fresnillo, Pánuco, Pinos y Villa de Cos) en el periodo 2003-2018 (SIAP, 2019).

#### 5.2.2.1.1. Jalpa

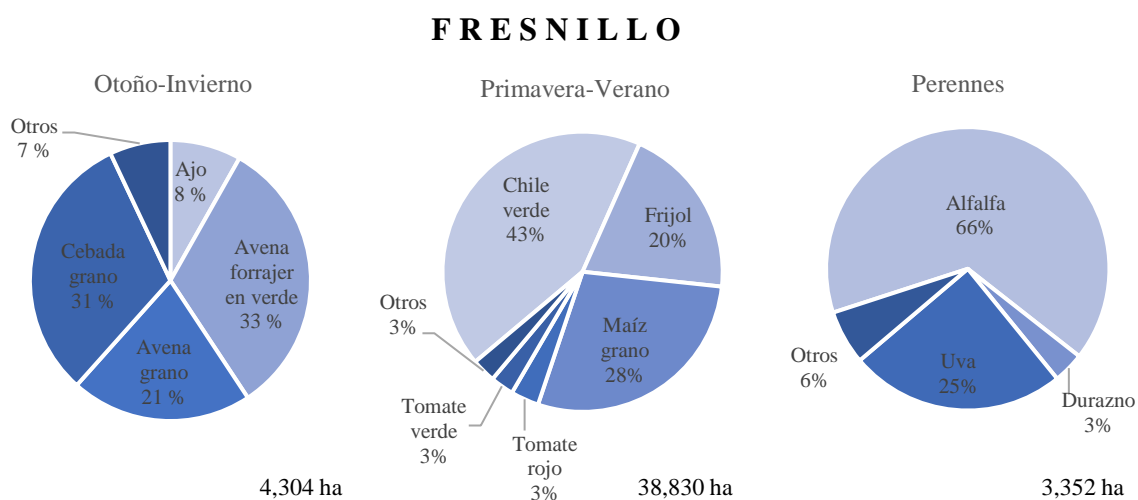
La distribución de los principales cultivos sembrados en los ciclos OI, PV y PER en el municipio de Jalpa se muestra en la Figura 18. En el ciclo OI predomina el cultivo de avena forrajera en verde con un 39 %, seguido del cultivo de tomate rojo y tomate verde con 19 y 18 % respectivamente, en el caso del ciclo PV los municipios con mayor superficie sembrada son maíz grano con el 35 % y el cultivo de calabacita con 18 % y finalmente el ciclo PER que se caracteriza por el cultivo de guayaba con 56 % y alfalfa con 15 % de la superficie sembrada.



**Figura 18.** Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Jalpa en 2018 (SIAP, 2019).

#### 5.2.2.1.2. Fresnillo

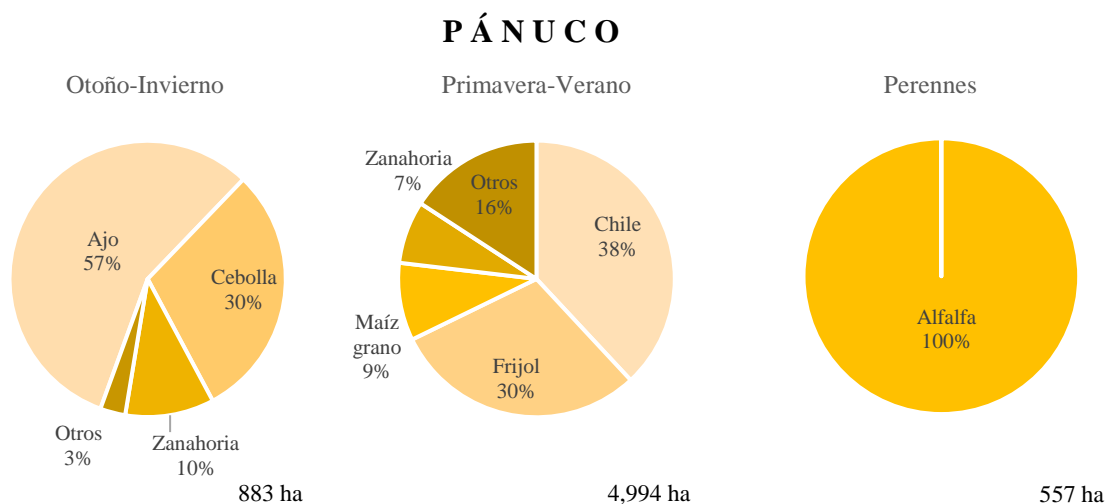
Un caso especial es el municipio de Fresnillo, puesto que cuenta con mayor superficie en unidades de riego y mayor superficie sembrada en modalidad de riego en todo el estado de Zacatecas. En el ciclo OI los cultivos con mayor superficie sembrada lo ocupa el cultivo de avena forrajera en verde con una superficie de 33 % y el cultivo de cebada con 31 %. En el ciclo PV destaca el cultivo de chile con al menos 43 % de la superficie y maíz de grano 28 %; además en el ciclo PER destaca el cultivo de alfalfa 66 % se la superficie sembrada en 2018 (Figura 19).



**Figura 19.** Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Fresnillo en 2018 (SIAP, 2019).

#### 5.2.2.1.3. Pánuco

La distribución de los principales cultivos en el municipio de Pánuco se muestra en la Figura 20. El Cultivo de ajo representa el 57 % de la superficie sembrada en el ciclo OI y el cultivo de cebolla con 30 %. Para el ciclo PV se destaca los cultivos de chile y frijol con 38 y 30 % respectivamente, finalmente en el ciclo PER únicamente se siembra alfalfa.

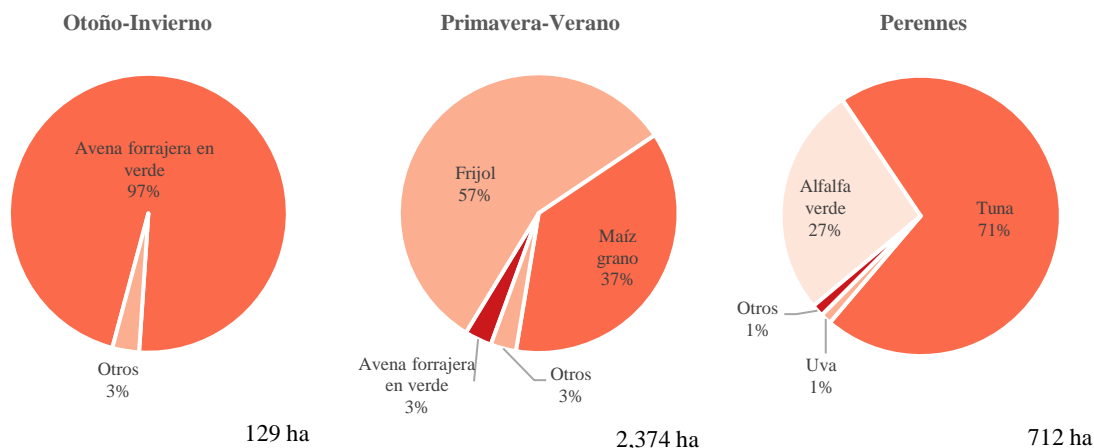


**Figura 20.** Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Pánuco en 2018 (SIAP, 2019).

#### 5.2.2.1.4. Pinos

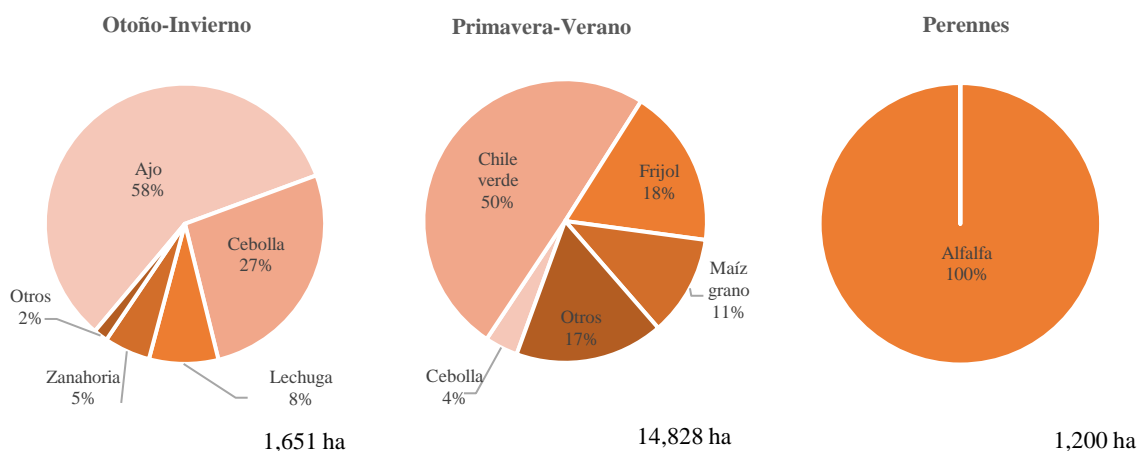
Pinos es el segundo municipio más importante con mayor superficie en unidades de riego. En el ciclo OI el 97 % de la superficie sembrada es de avena forrajera en verde, por otro lado, el cultivo de frijol y maíz de grano ocupan el 57 y 37 % respectivamente en el ciclo PV y finalmente, en el ciclo PER, el cultivo de tuna ocupa el 71 % y alfalfa y 21 % (Figura 21).

### P I N O S



**Figura 21.** Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Pinos en 2018 (SIAP, 2019).

## VILLA DE COS



**Figura 22.** Distribución de la superficie sembrada de los principales cultivos por ciclo agrícola en el municipio de Villa de Cos del estado de Zacatecas en el año 2018 (SIAP, 2019)

### 5.2.2.1.5. Villa de Cos

En la Figura 22 se ilustra la distribución de la superficie sembrada del municipio Villa de Cos; en el ciclo OI se siembra ajo y cebolla con 58 y 27 % respectivamente; en PVer el cultivo de chile ocupa el 50 % y frijol 18 %; finalmente en el ciclo perennes el cultivo de avena se emplea únicamente para sembrar en esa temporada.

### 5.2.2.2. Análisis de la evolución del rendimiento de la superficie cultivada en los principales municipios con mayor superficie de unidades de riego

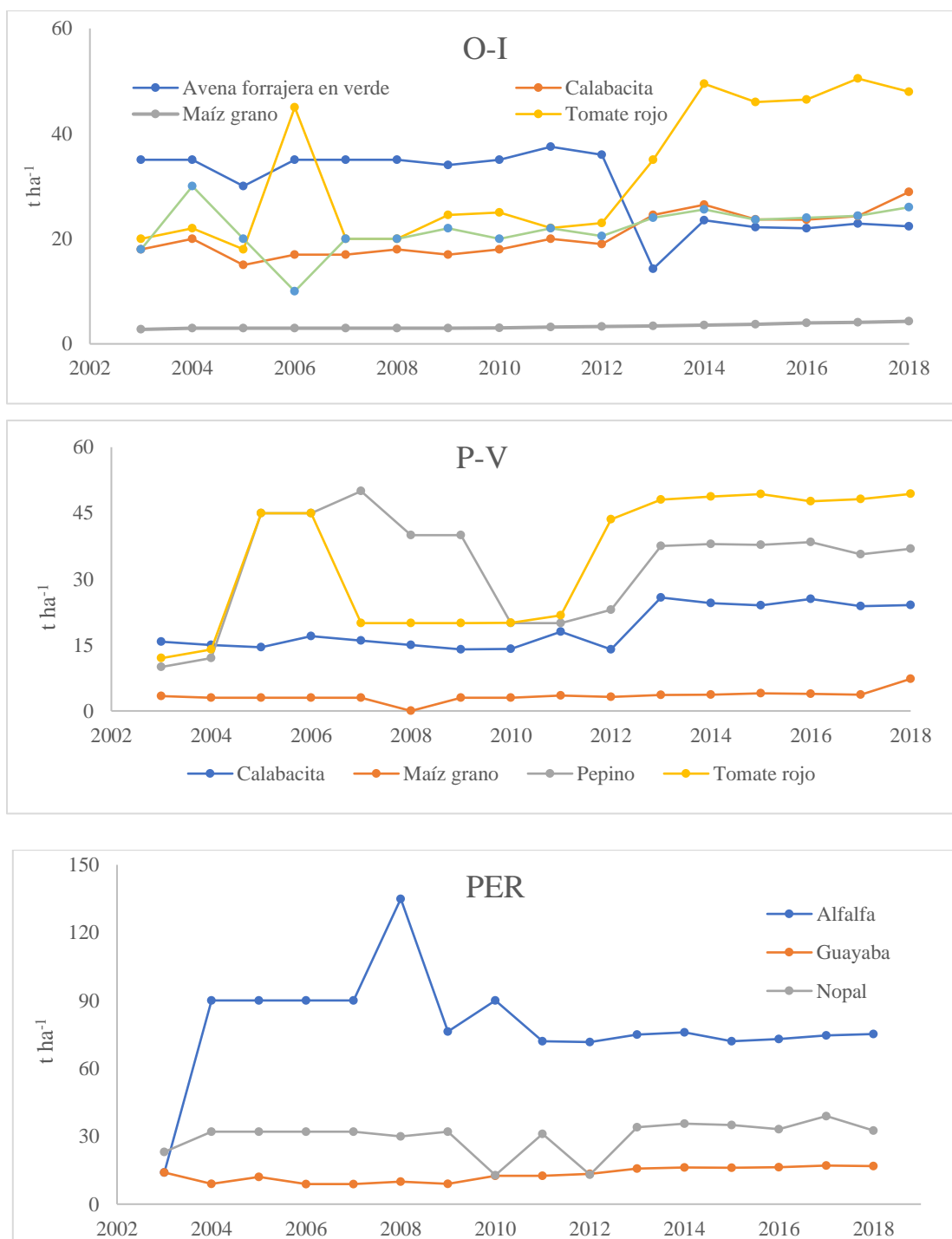
El análisis de la evolución del rendimiento se hizo en los principales cultivos de importancia agrícola en los municipios de Jalpa, Fresnillo, Pánuco, Pinos y Villa de Cos en los periodos OI, PV y PER en el periodo (2003-2018).

#### **5.2.2.2.1. Jalpa**

La evolución del rendimiento en los ciclos OI, PV y PER del municipio de Jalpa se ilustra en la Figura 23. En el ciclo OI, el cultivo de tomate rojo registró en 2003 un rendimiento de 20 t ha<sup>-1</sup> y alcanzó su máxima producción en 2014 con cifras de hasta 49.5 t ha<sup>-1</sup>, el cultivo de avena forrajera en verde presentó un rendimiento en 2003 de 35 t ha<sup>-1</sup> y en 2013 registró una caída mayor al 50 % de máxima producción; actualmente se mantiene a 22 t ha<sup>-1</sup> en los últimos años. En el caso del ciclo PV, el cultivo de pepino ha registrado cifras altas en producción en los años 2004 a 2007, en éste último año alcanzó su máximo rendimiento registrado con 50 t ha<sup>-1</sup>, seguido de una caída en 2010 de 60 %, y recupero en 2013, con 37.5 t ha<sup>-1</sup>, finalmente en el ciclo PER el cultivo de alfalfa tiene un crecimiento de hasta 600 %, ya que en 2003 registro un rendimiento de 13.5 % y en 2004 tuvo un rendimiento de 90 t ha<sup>-1</sup>, en 2008 registro su máximo potencial de 135 t ha<sup>-1</sup>, en 2009 registro perdidas de aproximadamente 50 %, actualmente se mantiene en valores de 70 a 80 t ha<sup>-1</sup>.

#### **5.2.2.2.2. Fresnillo**

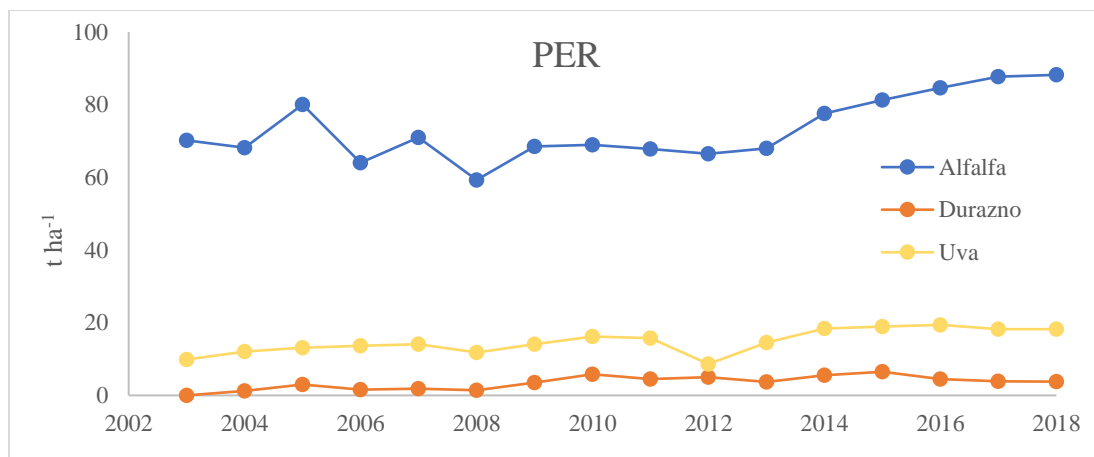
La evolución del rendimiento en los ciclos OI, PV y PER del municipio de Fresnillo se muestra en la Figura 24.



**Figura 23.** Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Jalpa bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019).

El cultivo de avena forrajera en verde es de gran importancia, la superficie sembrada de éste cultivo representa la tercera parte del total de superficie sembrada en el municipio, además en 2003 registro un rendimiento de 30 t ha<sup>-1</sup> sin embargo dicha cifra cambió un año después, con pérdidas de hasta 28 t ha<sup>-1</sup>, además en 2006 a 2014 se mantuvo estable el rendimiento. El cultivo de ajo ha registrado un crecimiento mayor al 200 % en el periodo de 2003 a 2018. En el ciclo PV los cultivos con mayor evolución en rendimiento son el cultivo de tomate rojo y tomate verde, ambos compiten en rendimiento, en 2003 registraron un rendimiento de 27.7 y 25 t ha<sup>-1</sup> respectivamente y en 2018 aportaron 47.7 y 46.55 t ha<sup>-1</sup>; el cultivo de chile, tuvo un crecimiento promedio anual de 0.4 %, con ligeras pérdidas en 2007 y 2013. Finalmente el cultivo de alfalfa en 2003 registró un rendimiento de 70 t ha<sup>-1</sup>, alcanzando su máximo rendimiento en 2018 en el ciclo PER.





**Figura 24.** Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Fresnillo bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019).

#### 5.2.2.2.3. Pánuco

La evolución del rendimiento de principales cultivos en el municipio de Pánuco se muestran en la Figura 25. En el ciclo OI el cultivo de cebolla ha tenido un crecimiento promedio anual de 1.59 %, en 2003 registró cifras de rendimiento de 20 t ha<sup>-1</sup> y en 2018 aportó 45.5 t ha<sup>-1</sup> con una ligera baja en 2007. El cultivo de zanahoria ha aumentado el rendimiento en los últimos años con 27 t ha<sup>-1</sup> en 2003, y se observa un rendimiento máximo de 40 t ha<sup>-1</sup> en 2006 y 2007, dicho rendimiento es característico en el ciclo PV. La producción del cultivo de maíz de grano tiene un crecimiento promedio anual de 0.1 %, a pesar de ser baja la evolución Pánuco es uno de los municipios donde el maíz de grano presenta mayor rendimiento con 7.46 t ha<sup>-1</sup> en 2017 y 2018. Finalmente, en el ciclo PER el cultivo de alfalfa ha tenido un crecimiento considerable e importante a partir de 2004 y cuenta con un crecimiento promedio anual del 5 %.

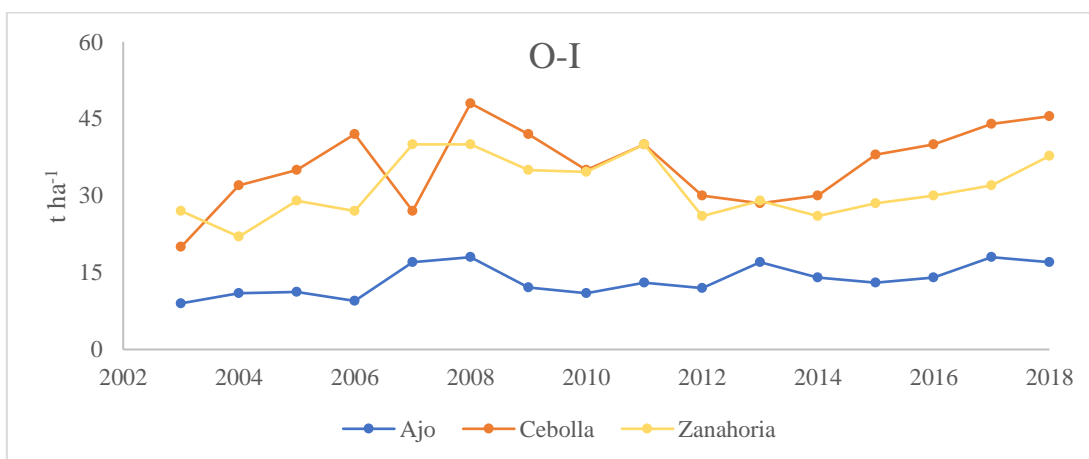
#### 5.2.2.2.4. Pinos

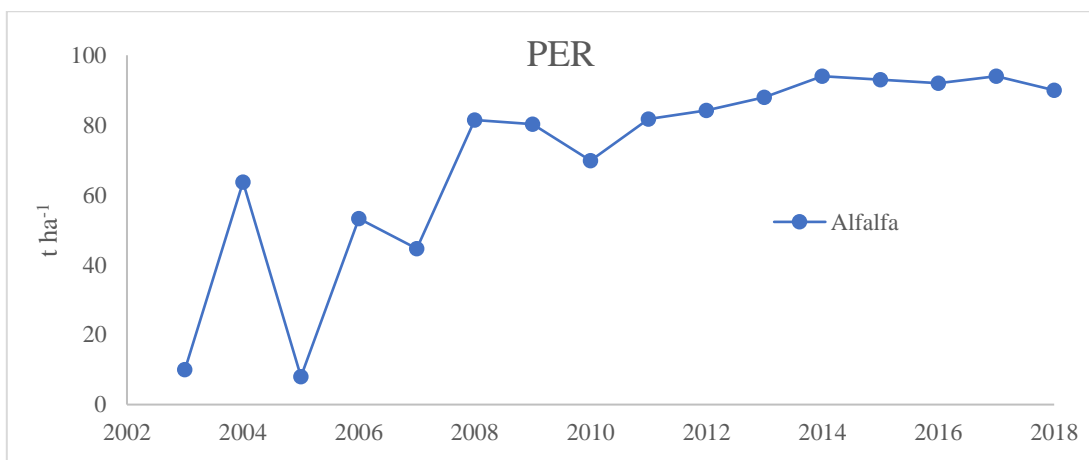
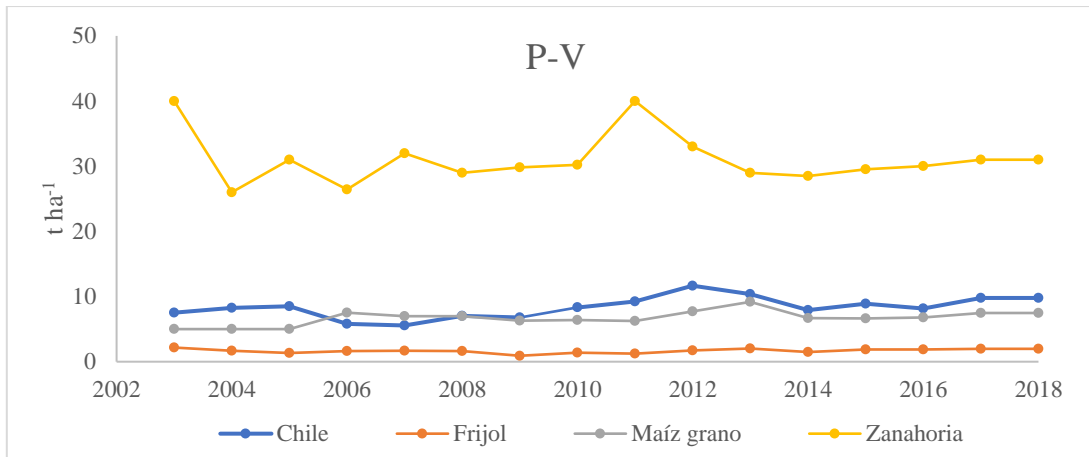
La evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en los ciclos OI, PV y PER se muestra en la Figura 26. El ciclo agrícola OI en el municipio de Pinos suelen sembrar ajo, cebolla y avena forrajera en verde, sin embargo no en todo el periodo de estudio (2003-2018) cuenta con el registro de todos los cultivos en el Sistema de Información Agrícola y

Pecuaria (SIAP); el cultivo de avena forrajera tiene registro en 2003 con un rendimiento de 12 t ha<sup>-1</sup>, pero el registro no se llevó a cabo sino hasta 2011 con 13 t ha<sup>-1</sup> y su máximo rendimiento en 2018 fue de 16.6 t ha<sup>-1</sup>. En el ciclo PV, el cultivo de frijol ha tenido un crecimiento promedio anual de 0.06 % de 2003 a 2018, mientras que el cultivo de chile se mantiene entre 5.5 y 6.5 t ha<sup>-1</sup> de 2003 a 2018, con un máximo rendimiento en 2004 y 2005 y una superficie siniestrada en 2017, finalmente en ciclo perennes los 2 principales cultivos en cuanto a evolución de rendimiento se encuentra la alfalfa verde con un crecimiento promedio anual de 1.58 %, aportando un rendimiento máximo en 2014 y 2015.

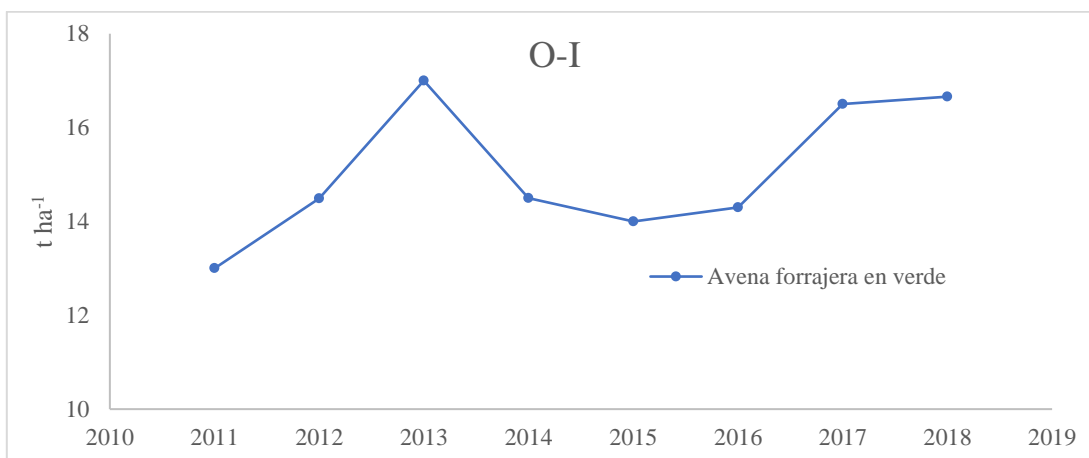
#### 5.2.2.2.5. Villa de Cos

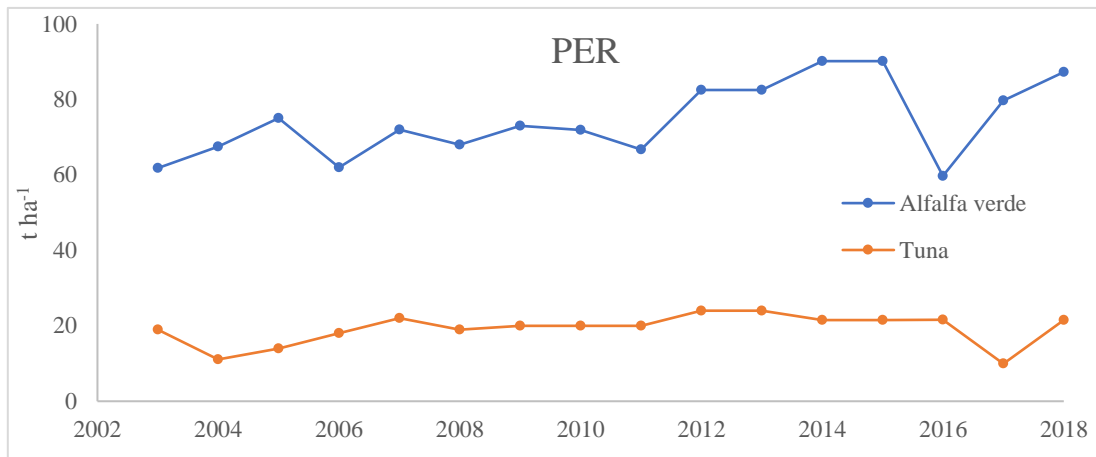
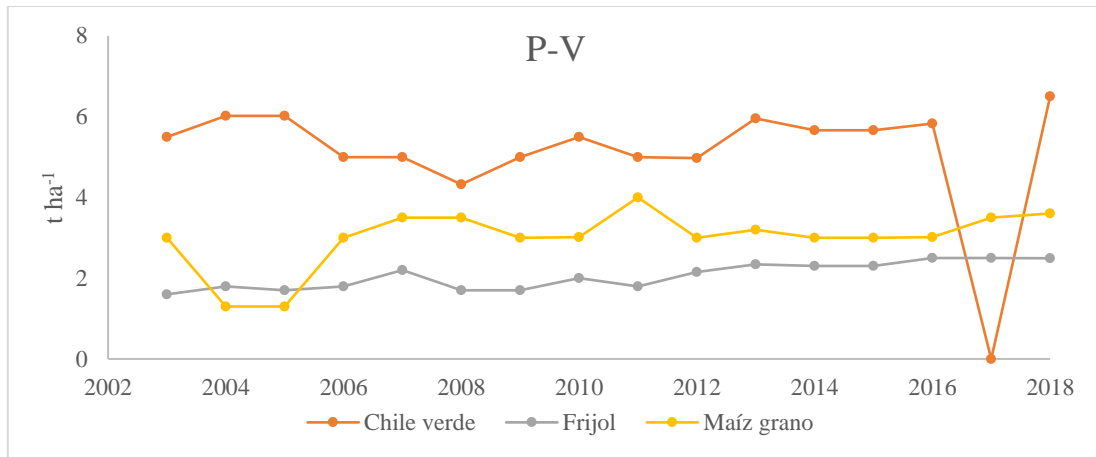
En la Figura 27 se muestra la evolución del rendimiento en el municipio Villa de Cos en el periodo de estudio 2003-2018. Villa de Cos es el cuarto municipio con mayor superficie cultivada en el estado de Zacatecas y el segundo municipio con mayor superficie de unidades de riego. El cultivo de cebolla en el ciclo OI ha presentado un crecimiento promedio anual de 0.75 %, en 2003 tuvo un rendimiento de 30 t ha<sup>-1</sup> y en 2008 registró 45 t ha<sup>-1</sup> siendo éste último el máximo rendimiento que ha tenido a la fecha, Villa de Cos es el principal municipio productor de cebolla; en el caso de cultivo de ajo, presentó un rendimiento de 10 t ha<sup>-1</sup> en 2003, registró su máximo rendimiento en 2017 con 17 t ha<sup>-1</sup>. En el ciclo PV, la evolución del rendimiento del cultivo de cebolla ha sido de 34 t ha<sup>-1</sup> en 2003 y ascendió 39 t ha<sup>-1</sup> en 2008, mientras que el cultivo de maíz de grano mantiene una ligera evolución de rendimiento. En el ciclo PER el cultivo de alfalfa cuenta con un crecimiento promedio anual del 5 %; en 2003 registró 9 t ha<sup>-1</sup> mientras que en 2018 aportó 90 t ha<sup>-1</sup>.



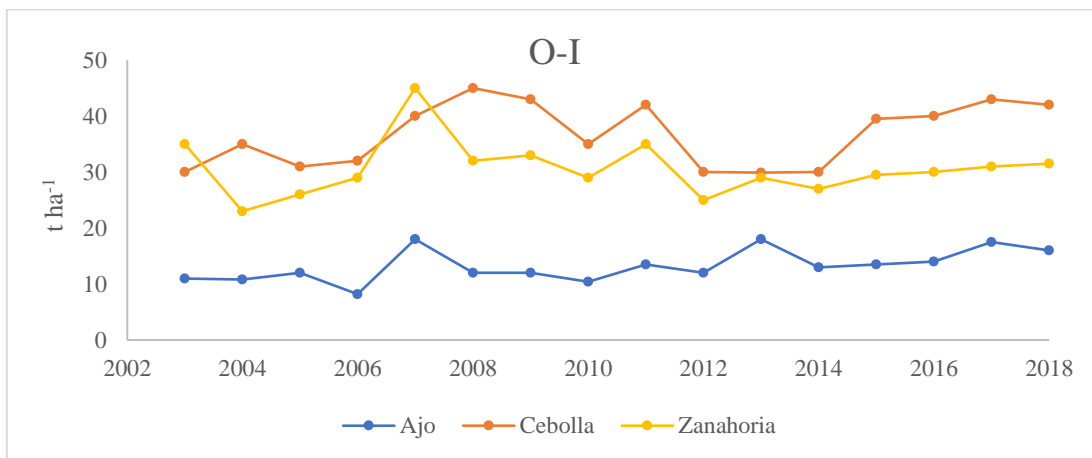


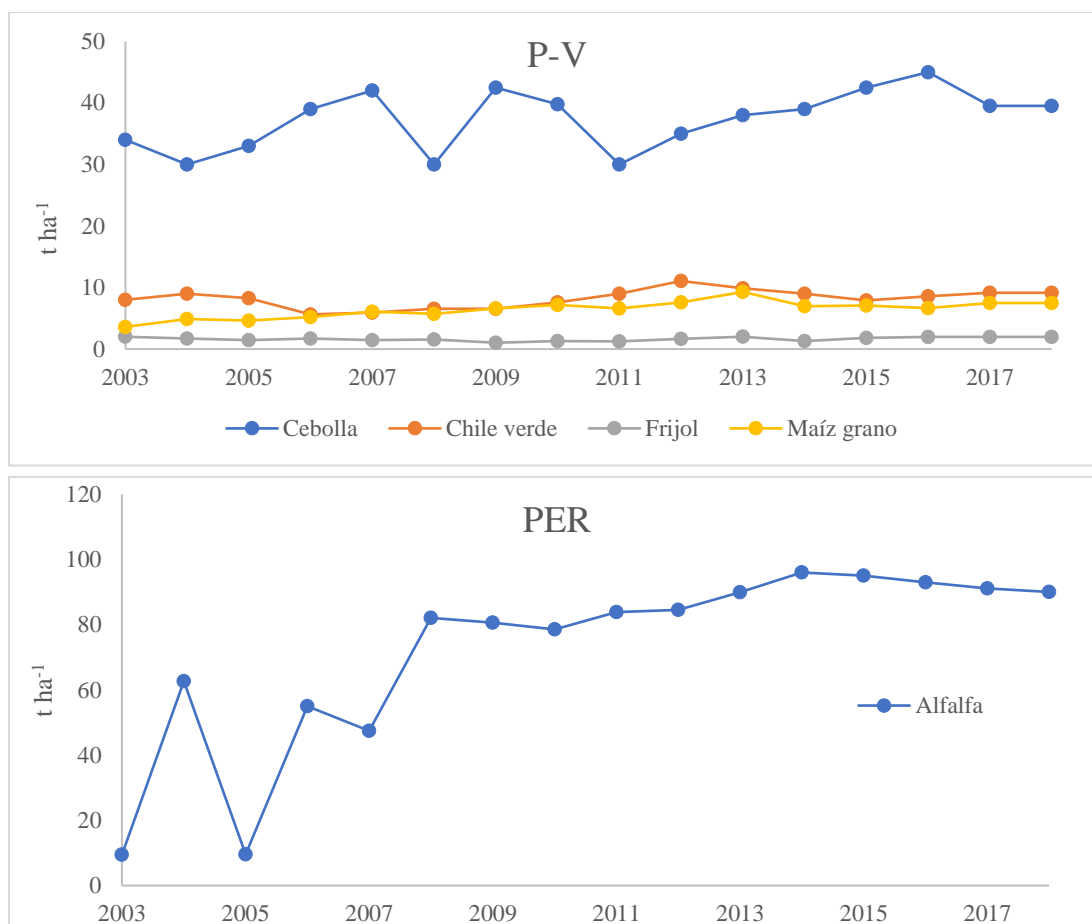
**Figura 25.** Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Pánuco bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019).





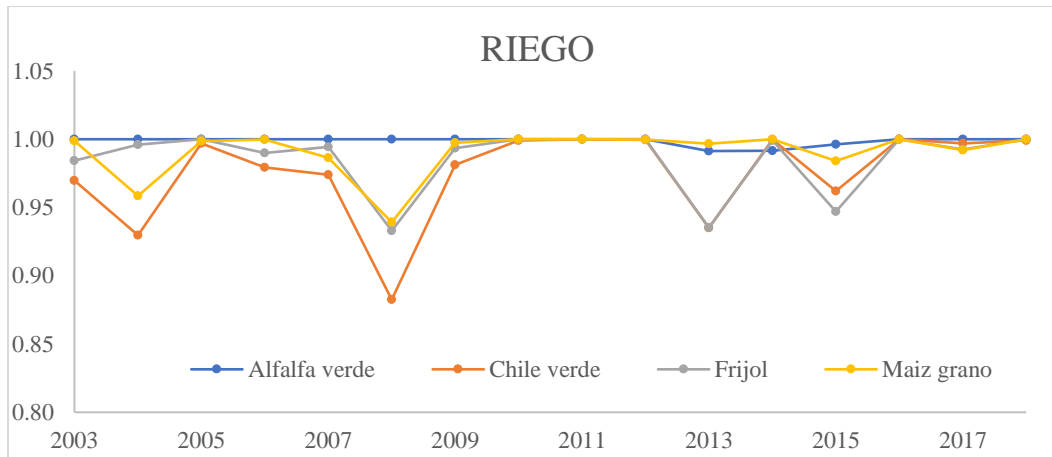
**Figura 26.** Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Pinos bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019).





**Figura 27.** Evolución del rendimiento de los principales cultivos agrícolas en el municipio de Villa de Cos bajo el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, en el periodo de estudio 2003-2018 (SIAP, 2019).

En el análisis de la relación superficie cosechada/sembrada, se empleó el promedio de la superficie sembrada y cosechada de los 5 municipios en la modalidad de riego y finalmente se obtuvo la relación CS en el periodo 2003 a 2018 (Figura 28). Se observa que los cultivos no mostraron susceptibilidad en la relación CS a excepción del cultivo de chile con un valor ligeramente bajo (0.88) en 2008, lo cual es un indicativo de la productividad, ya que se mantiene estable (Figura 28).

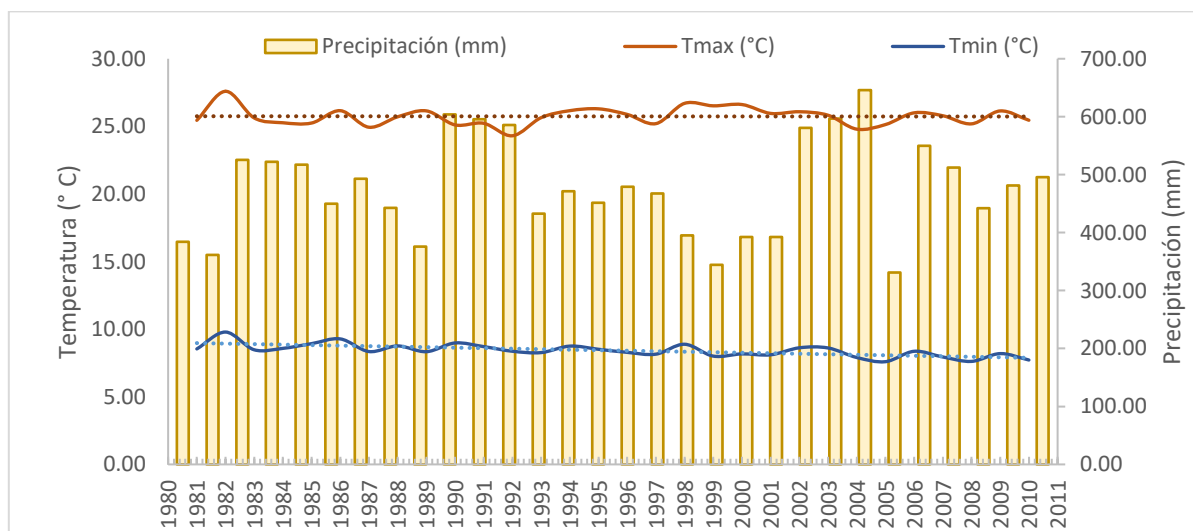


**Figura 28.** Evolución de la relación entre superficie cosechada/sembrada (CS) de los principales cultivos en los municipios de Jalpa, Fresnillo, Pánuco, Pinos y Villa de Cos (SIAP, 2019).

### 5.3. Análisis espacio-temporal de estaciones climáticas del estado de Zacatecas

#### 5.3.1. Distribución de la precipitación total, temperatura máxima y temperatura mínima promedio anual en el estado de Zacatecas

En la Figura 29 se representa la distribución de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima promedio multianual del periodo de 1981 a 2010.

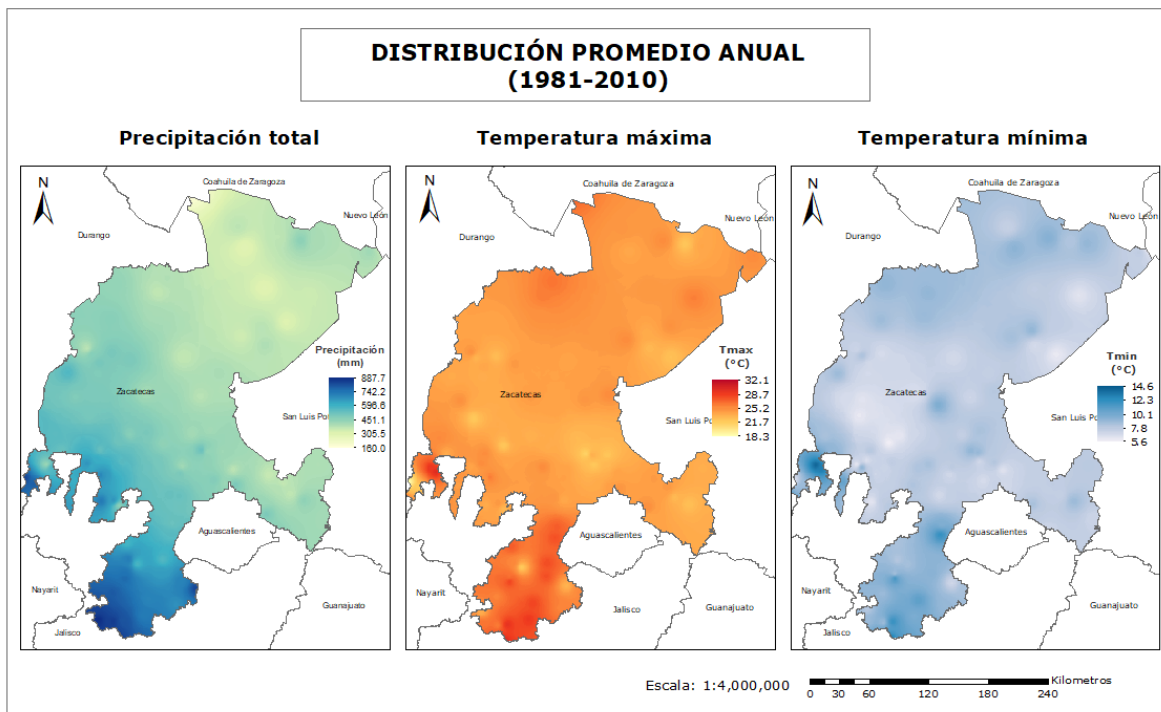


**Figura 29** Distribución promedio anual de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo 1981 a 2010 en el Estado de Zacatecas (SMN, 2011).

La precipitación total promedio es de 510 mm, con un máximo volumen en 2005 de 645.9 mm y una precipitación mínima en 2005 con 313 mm; en la figura se muestra el comportamiento de la precipitación, la cual sigue un patrón de variabilidad estacional, es decir, el patrón consiste periodos húmedos o secos.

La temperatura máxima promedio anual es 25.7 °C, el año más caluroso se registró en 1982 con una temperatura máxima de 27.5 °C; la temperatura mínima promedio es de 8.4 °C, con una mínima de 7.6 °C registrada en 2005. En la Figura 29 se observa un ligero descenso en la temperatura máxima promedio cuando hay mayores volúmenes de precipitación.

La distribución espacial de la precipitación acumulada, temperatura máxima, temperatura mínima promedio anual se muestra en la Figura 30.

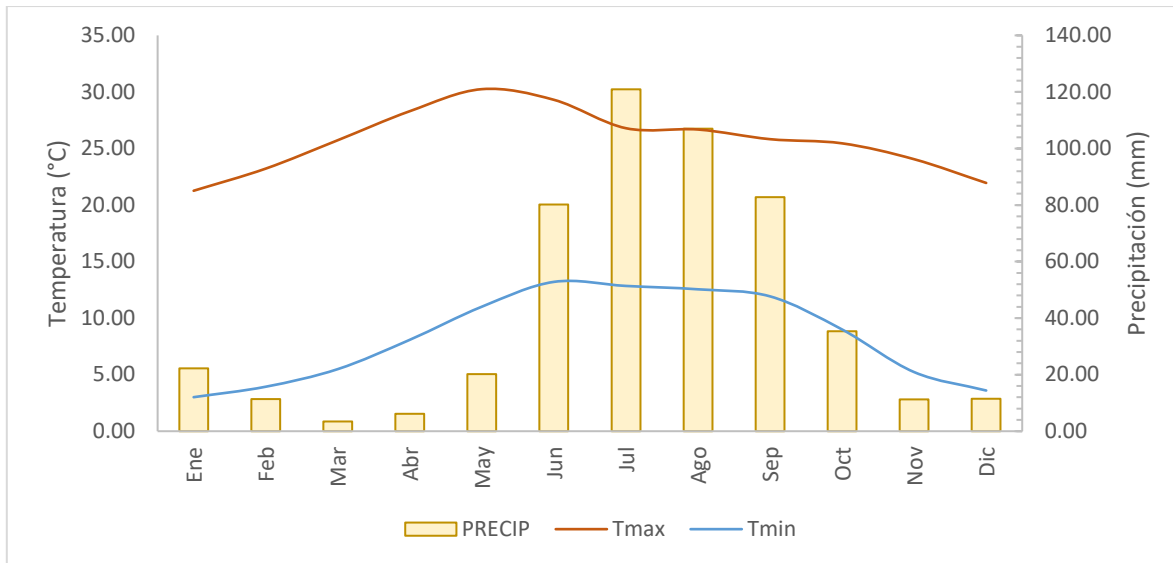


**Figura 30.** Distribución espacial de precipitación total, temperatura máxima y temperatura mínima media anual (1981-2010).

La precipitación total en el estado de Zacatecas se distribuye de suroeste a noreste del estado con un volumen de precipitación que va de 160 a 887 mm, presentando mayores valores en la región sur, con 570 a 887 mm mientras que al norte del estado se presentan volúmenes de 160 a 470 mm. En el caso de la temperatura máxima promedio oscila entre 18.3 a 34.9 °C; concentrando las mayores temperaturas al sur del estado, mientras que en la región norte la temperatura máxima alcanza los 30 °C y por otro lado en la región centro la máxima temperatura es de 22 °C. Finalmente la distribución de la temperatura mínima promedio se presenta en un rango de 5.5 a 15.2 °C; en la región noreste y centro se presentan bajas temperaturas 5.5 a 8 °C, mientras que en la región sur la temperatura mínima promedio es de 12.8 a 15.2 °C.

### **5.3.2. Distribución de precipitación acumulada, temperatura máxima y temperatura mínima promedio mensual en el estado de Zacatecas**

La distribución de la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada promedio mensual se presenta en la Figura 31, donde se observa la estacionalidad de las lluvias en los meses del año y su mayor concentración en los meses de mayo a octubre. La precipitación acumulada promedio mensual es de 42.7 mm, siendo julio y agosto los meses con mayores volúmenes de precipitación 120.9 y 107 mm respectivamente; por otra parte, marzo y abril son los meses con menor precipitación acumulada mensual, con volúmenes de 3.4 y 6.1 mm respectivamente.



**Figura 31** Distribución promedio mensual de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo 1981 a 2010 en el Estado de Zacatecas (SMN, 2011).

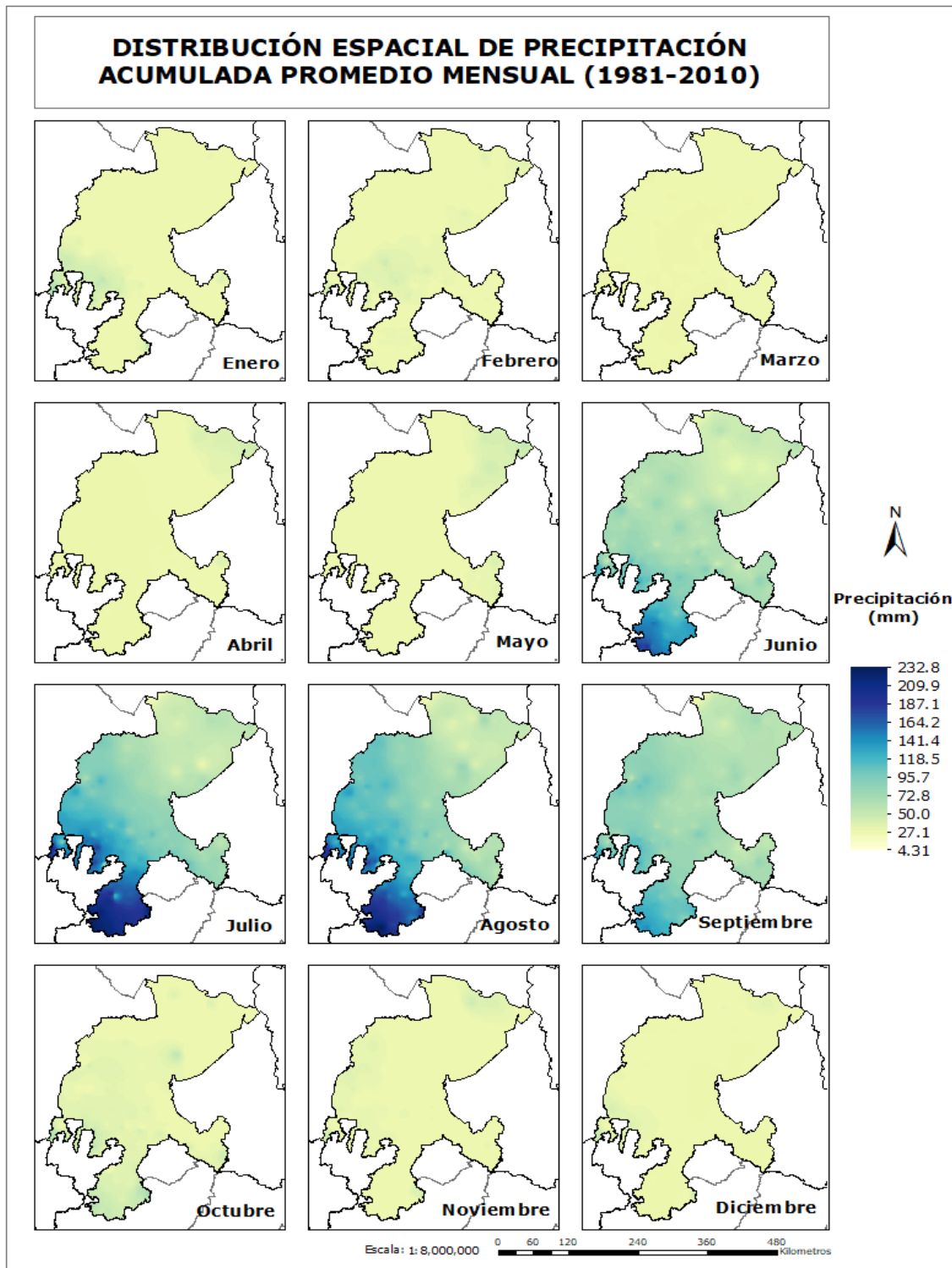
La temperatura máxima promedio mensual es de 25.7 °C, los meses más calurosos son abril, a junio con temperaturas cercanas a los 30 °C, siendo mayo el mes más caluroso con una temperatura máxima promedio de 30.2 °C; la temperatura mínima promedio mensual es de 8.3 °C, con una mínima de 3 °C en el mes de enero.

Por otra parte, en el análisis espacial la precipitación acumulada promedio mensual en el estado se ilustra en la Figura 32, donde se observa que la distribución de la precipitación en el estado ocurre del suroeste al noreste, con altos índices de lluvia al sur del estado. El rango de precipitación es 4.31 a 232.8 mm y se distribuye con mayor incidencia en los meses de mayo a octubre, siendo julio el mes con mayor volumen de precipitación 100 a 232.8 mm, misma que se concentra en la región sur del estado; por otra parte, en noviembre al mes de abril se presentan bajas precipitaciones 4.3 a 46 mm al mes.

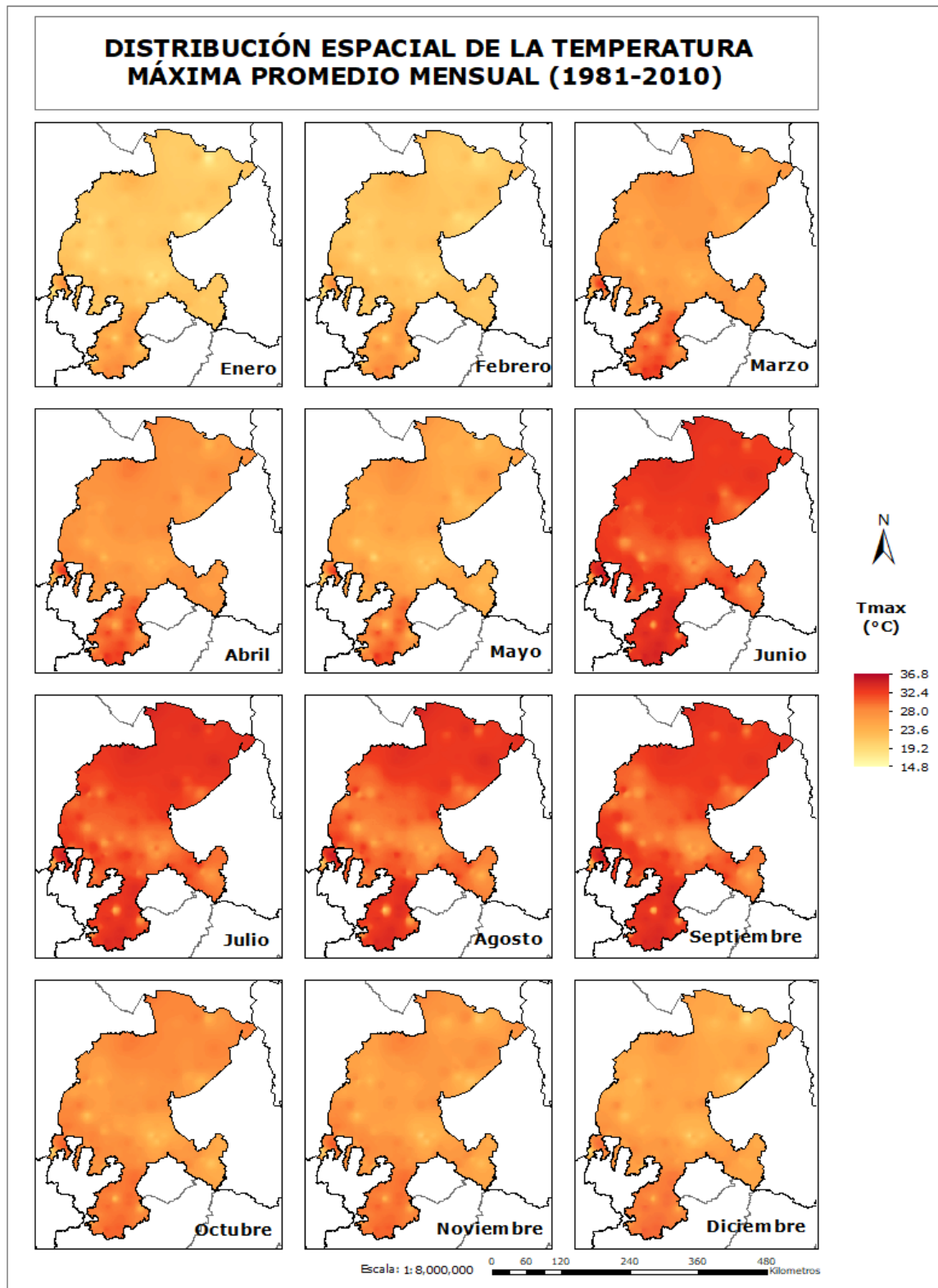
La temperatura máxima promedio mensual en el estado de Zacatecas se muestra en la Figura 33. La temperatura máxima promedio mensual que se registran en los meses de enero a diciembre oscila en un rango de 32 a 36.8 °C; los meses más calurosos se presentan de mayo a septiembre con temperaturas que van de los 32 a 36.8 °C, y se concentra con mayor

intensidad al norte y sur del estado, siendo la región sur la más calurosa de Zacatecas, inclusive la temperatura asciende desde el mes de marzo.

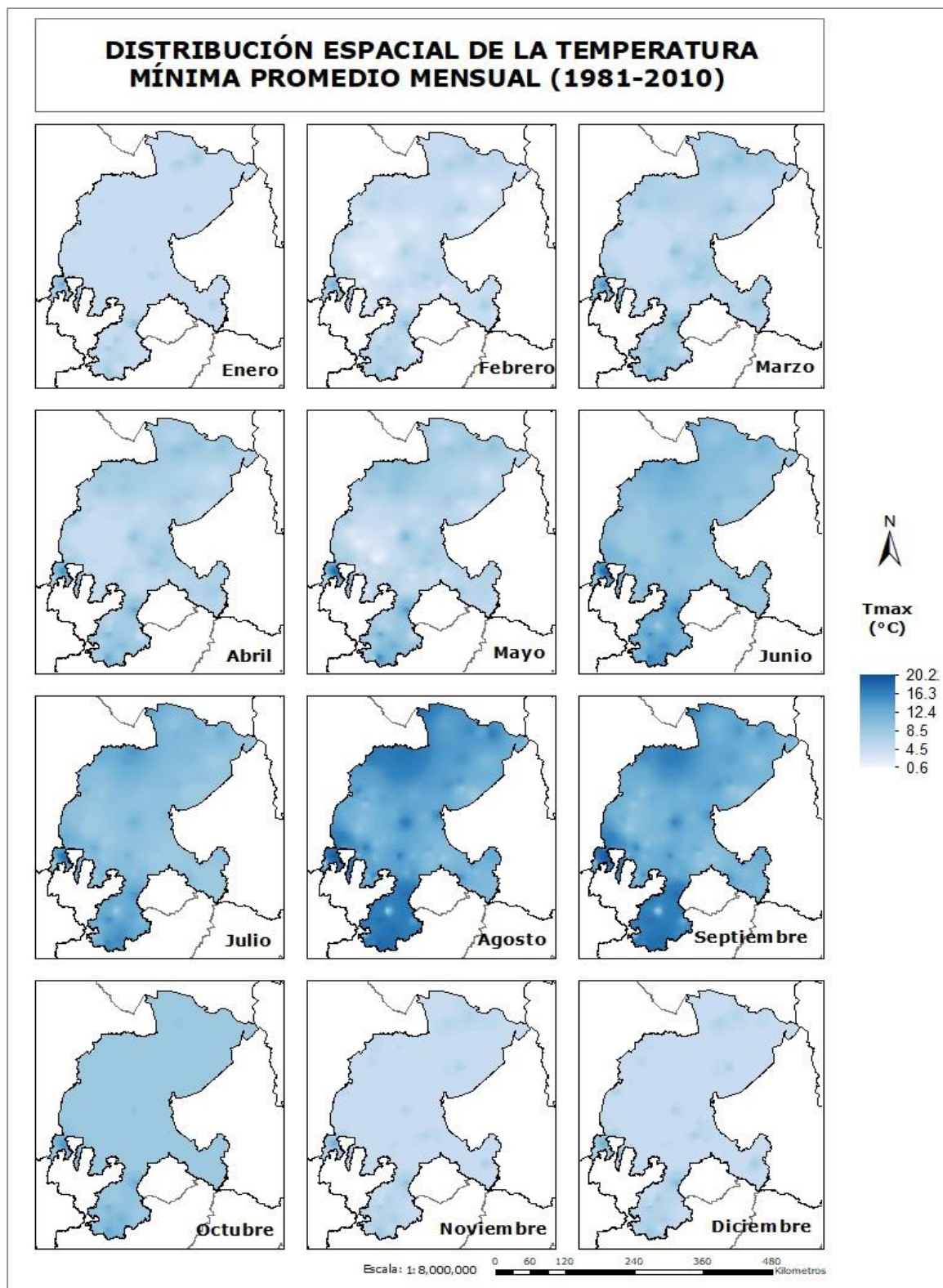
En la Figura 34 se muestra la distribución de la temperatura mínima promedio en el estado, donde el rango de temperatura mínima es de 0.6 a 20.2 °C. En los meses de noviembre a febrero se presentan bajas temperaturas (0.4 a 8.7 °C) distribuidas con mayor intensidad en la región centro y norte del estado, principalmente en las sierras; mientras que en los meses de junio a septiembre, el rango de temperatura mínima oscila entre 12.9 a 20.2 °C.



**Figura 32.** Distribución espacial de la precipitación acumulada promedio mensual (1981-2010).



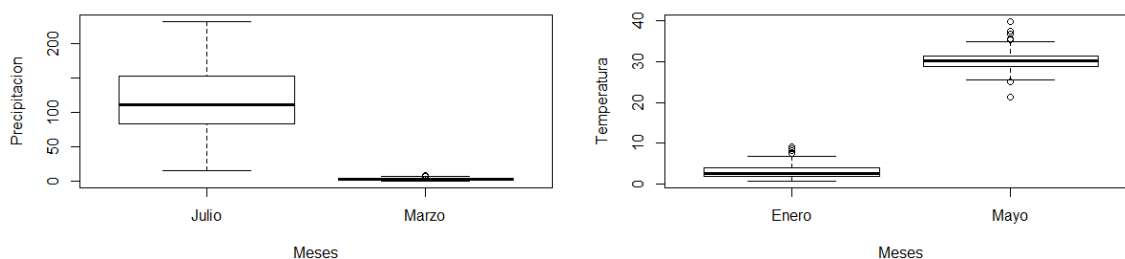
**Figura 33.** Distribución espacial de la temperatura máxima promedio mensual (1981-2010).



**Figura 34.** Distribución espacial de la temperatura mínima promedio mensual (1981-2010)

### 5.3.3. Distribución de estaciones climáticas con registros extremos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada

La distribución de registros extremos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada promedio en las estaciones climáticas se representa en la Figura 35.



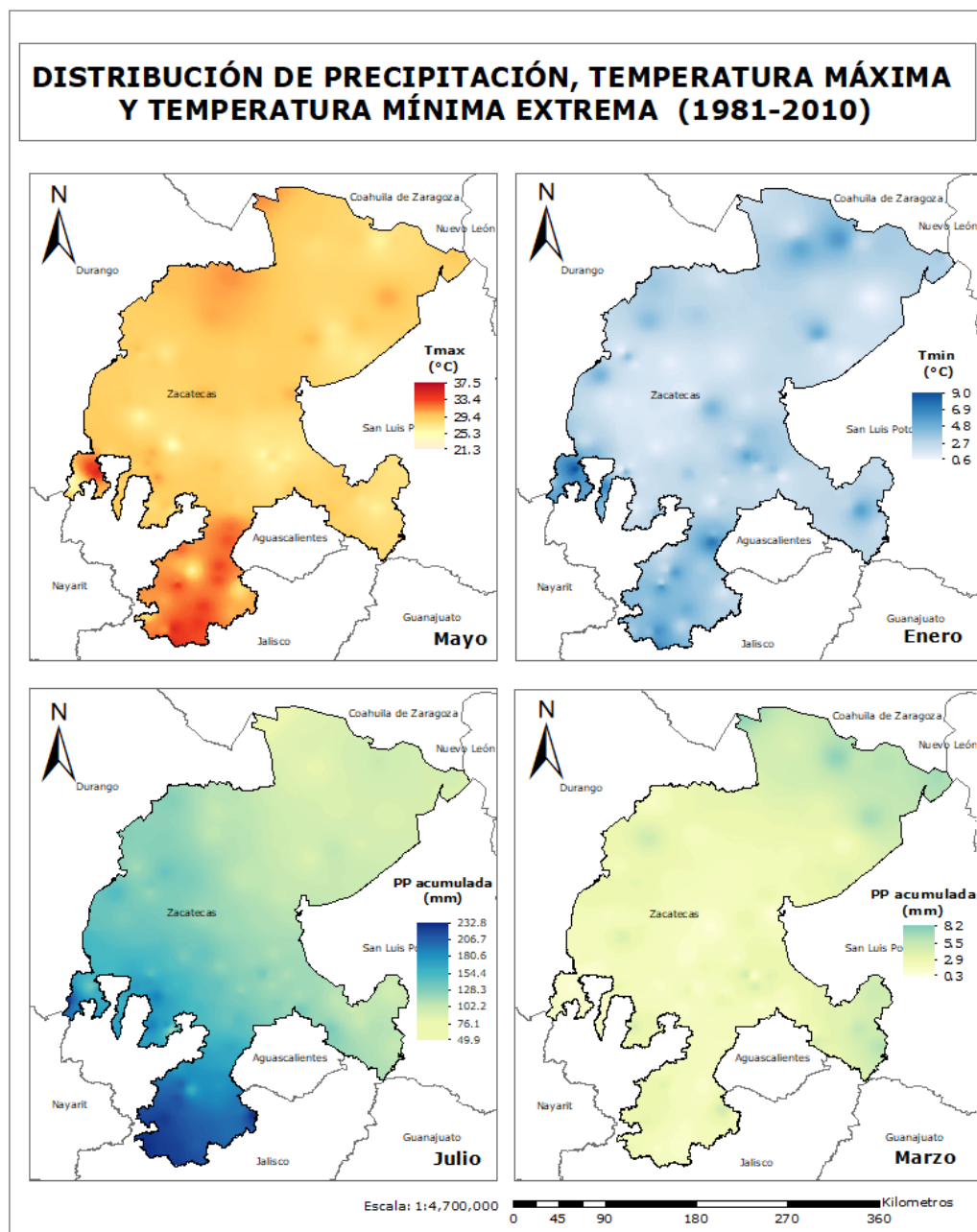
**Figura 35.** Distribución de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y precipitación acumulada promedio mensual en las estaciones climáticas del estado de Zacatecas en el periodo 1981-2010 (SMN, 2011).

La precipitación máxima y mínima extrema se presenta en los meses de julio y marzo, donde se registran los volúmenes máximos y mínimos al año en el periodo 1981 a 2010, en la Figura 35 se visualiza la presencia de al menos trece estaciones con registros de volúmenes mayores a 200 mm de precipitación en el mes de julio y más del 80% de estaciones cuentan con registros menores a 150 mm; la precipitación mínima acumulada en el mes de marzo se presentan bajos volúmenes, con un rango de precipitación de 0.3 a 8.27 mm.

Las temperaturas máximas y mínimas extremas fueron analizadas en los meses mayo y enero respectivamente, por contar con registros de las temperaturas más altas y bajas en el año. La temperatura máxima extrema promedio es de 29.4 °C con máximas de 37.5 °C y mínimas de 21.3 °C; por otro lado, el promedio de temperatura mínima extrema en el mes de enero es de 4.5 °C, con una máxima de 8.7 °C y una mínima de 0.4 °C,

En la Figura 36 se muestra la distribución espacial de la precipitación acumulada, temperatura máxima y temperatura mínima promedio mensual en los meses con registros extremos que han surgido en el periodo de 1981 a 2010 en el estado; se observa que los

fenómenos de temperatura y precipitación se distribuyen desde la región suroeste al noreste del estado, con los máximos valores.



**Figura 36.** Distribución espacial de precipitación acumulada, temperatura máxima y temperatura mínima promedio mensual extrema (1981-2010).

La distribución de las precipitaciones máximas en el mes de Julio oscila de 49.9 a 238.8 mm. La mayor precipitación se observa al sur del estado con volúmenes de 133 a 238.8 mm, en la

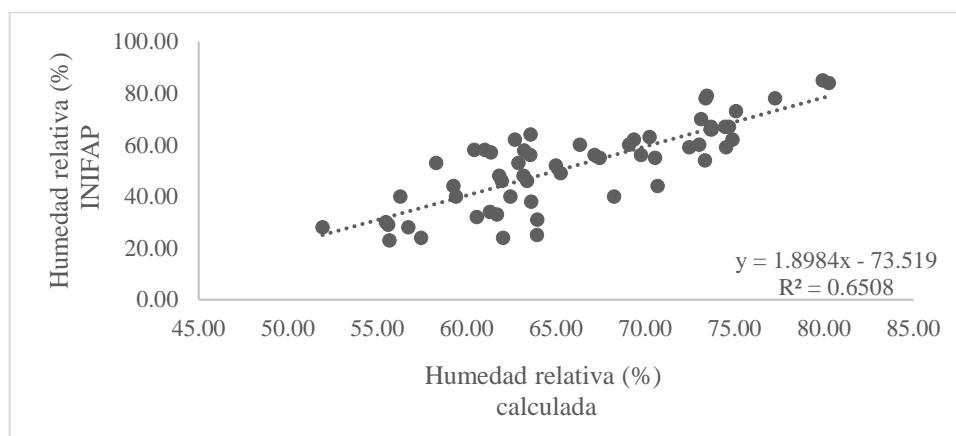
región centro las máximas precipitaciones son 70 a 130 mm y al norte del son menores a los 60 mm; por otra parte, la precipitación mínima extrema en el mes de marzo se presenta en al menos 70% de la superficie del estado, con precipitaciones de 0.3 a 6 mm, mientras que en la región noreste, la precipitación mínima extrema es de 8.9 mm.

El rango de temperatura máxima extrema en el mes de mayo es de 21.3 a 37.5 °C, presentando la máxima temperatura en la región sur del estado con temperaturas mayores a 37.5 °C, mientras que en la región centro y norte, la máxima temperatura es de 21 a 33 °C; por otra parte, la temperatura mínima extrema en el mes de enero oscila entre 0.8 a 9 °C, mostrando bajas temperaturas en la región centro y noreste del estado con 0.6 a 4.8 °C, cercano a las serranías del estado.

#### 5.4. Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

##### 5.4.1. Calibración de la humedad relativa (HR)

Se tomaron datos diarios de HR media de 3 estaciones agroclimáticas aleatorias de los últimos 2 años de registro (2018 y 2019) por INIFAP y se compararon con la HR calculada con datos de temperatura máxima, mínima y media de las mismas estaciones. En la Figura 37 se muestra un diagrama de dispersión para los datos de HR calculada y HR registrada por INIFAP. Se puede observar que, en forma general, los datos muestran una correlación respecto a los registros observados, con un intervalo de confianza  $R = 0.6508$ .



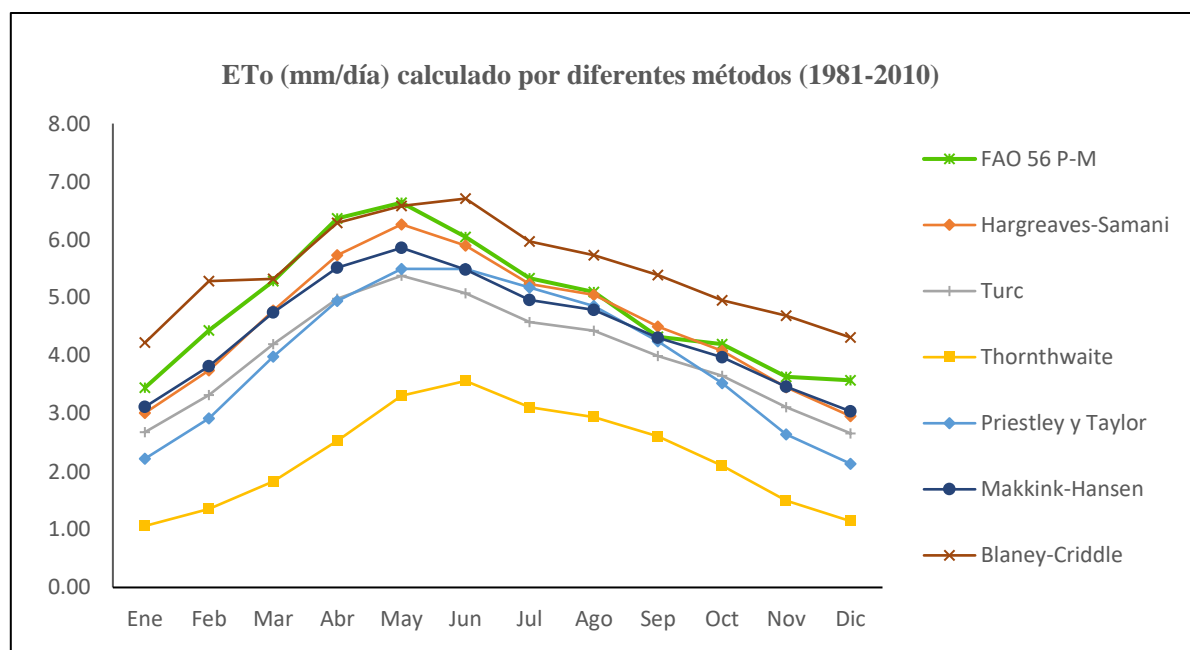
**Figura 37.** Distribución de la humedad relativa calculada y humedad relativa INIFAP.

El gráfico de dispersión muestra un coeficiente de determinación relativamente bajo, empleando datos mensuales promedio de velocidad del viento de estaciones agroclimáticas cercana. El considerar la velocidad del viento a  $2 \text{ m s}^{-1}$  sobreestimaría los valores de  $ET_o$ , de acuerdo con resultados de (Popova, Kercheva and Pereira, 2006) por lo tanto recomienda emplear datos anuales de velocidad del viento regional.

#### 5.4.2. Comparación entre métodos para estimación de evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ )

El análisis de dispersión de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) por los métodos FAO Penman-Monteith, Makkink, Hargreaves-Samani, Thornthwaite, Priestley y Taylor, Turc y Blaney-Criddle se presenta en la Figura 38, se observa que la distribución de todos los métodos sigue 2 tipos de tendencias, el primero, con valores crecientes en los meses de mayo- agosto, y el segundo con tendencias decrecientes en los meses de octubre-diciembre.

Los meses con valores altos de  $ET_o$  coinciden con la temporada de mayores precipitaciones y temperaturas altas, mientras que los meses con valores de  $ET_o$  bajos se caracterizan por descensos de temperatura y precipitación.



**Figura 38** Evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) calculada por diferentes métodos (1981-2010).

A su vez se observa que el método de Turc y Hargreaves-Samani, comparado con el método de FAO 56- Penman-Monteith, proporcionan valores cercanos al método de FAO 56. Los valores obtenidos por el método de Turc subestima ligeramente la ETo, mientras que el método Hargreaves-Samani sobreestima la ETo. El método Hargreaves-Samani es más accesible en cuanto al cálculo debido a que únicamente se requieren valores de temperatura máxima, mínima y media, tales parámetros se encuentran en todas las estaciones climáticas.

En el Cuadro 3 se muestran los resultados del error cuadrático medio (ECM), coeficiente de determinación  $R^2$  y la probabilidad. Todos los métodos de estimación de ETo fueron comparados con el método estándar FAO 56 Penman-Monteith. Se observa el método de Blaney-Criddle con la correlación lineal más débil ( $R^2 = 0.65$ ), mientras que Hargreaves-Samani, Turc y Makkink-Hansen son los métodos más fuertes ( $R^2 = 0.94$ ). Dichos métodos con valores de probabilidad menores al nivel de significancia de 0.05 ( $p < 0.05$ ), demostrando que el modelo fue apropiado. El valor del error cuadrático medio (ECM) más bajo se presentó en el método de Blaney-Criddle 1.05 y el máximo valor se presentó en el método Priestley-Taylor.

**Cuadro 5.** Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y análisis de varianza con el 95% de confiabilidad por los métodos de ETo comparados con FAO 56 Penman-Monteith en el periodo (1981-2010).

<b>Método</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Probabilidad</b>	<b>ECM* (mm/día)</b>
Hargreaves-Samani	0.94	6.44E-10	1.36
Turc	0.94	1.71E-87	1.13
Thornthwaite	0.6	0.00E+00	1.1
Priestley-Taylor	0.76	6.80E-77	1.41
Makkink-Hansen	0.94	1.49E-25	1.14
Blaney-Criddle	0.65	1.16E-46	1.05

\*ECM: Error Cuadrático Medio.

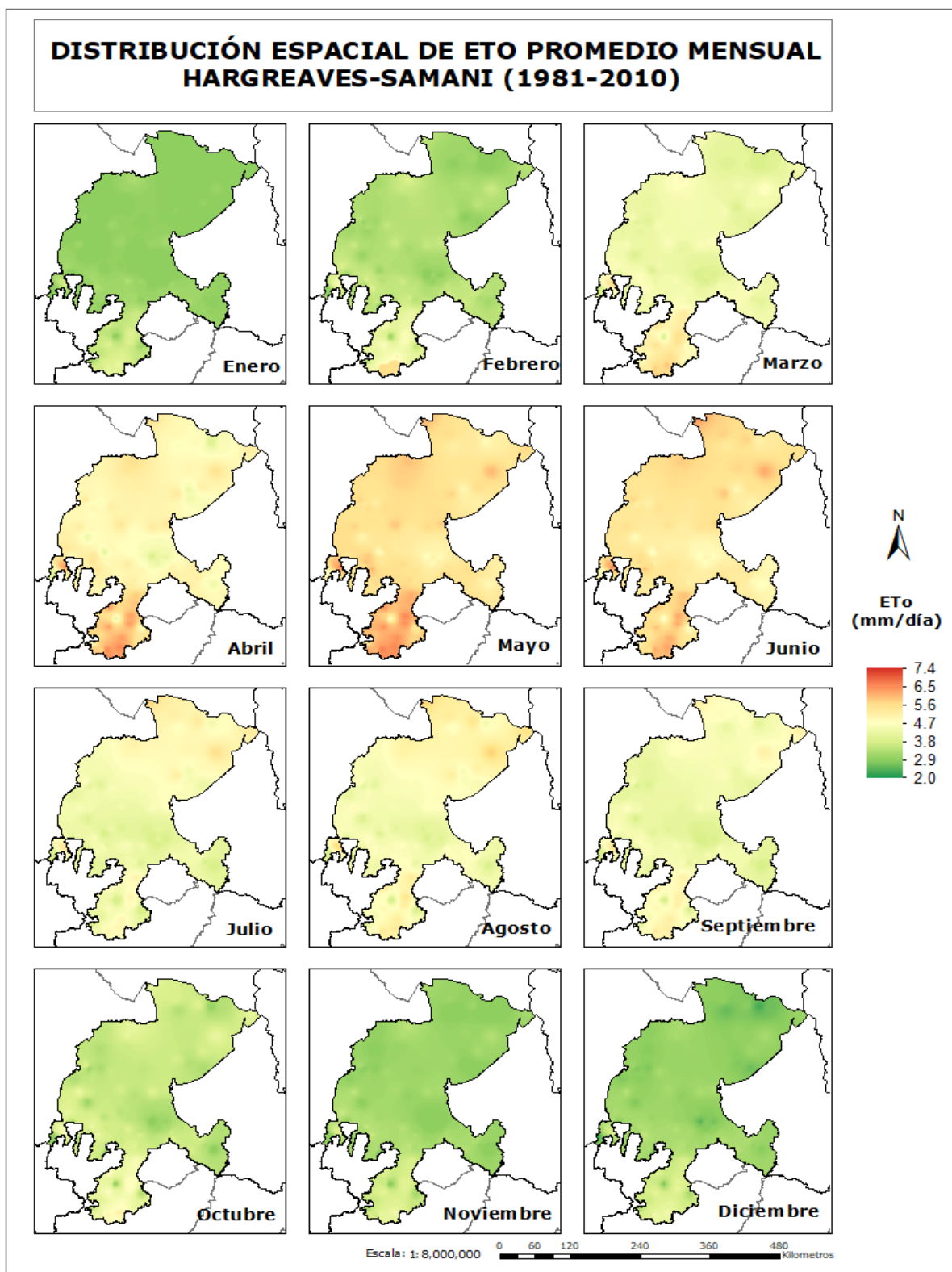
De acuerdo con lo anterior, Hargreaves-Samani, Turc y Makkink-Hansen fueron los métodos donde se presentó la mejor correlación lineal, por el contrario, los métodos Thornthwaite, Blaney-Criddle y Priestley-Taylor presentaron las correlaciones más débiles.

El método Hargreaves-Samani mostró tener mejor correlación lineal, además las variables que se requieren para éste método no son limitantes para el estado de Zacatecas en comparación con otros métodos; el método Hargreaves es el mejor enfoque para estimar la ETo bajo la condición de que solo estén disponibles datos de temperatura del aire ((Liu *et al.*, 2002) citado por (Li *et al.*, 2008)).

### **5.4.3. Análisis espacial de la evapotranspiración de referencia (ETo) por el método de Hargreaves y Samani**

La distribución espacial de ETo mensual de ilustra en la Figura 39; los valores oscilan entre 2 a 7.4 mm día<sup>-1</sup>, por otro lado, se observa que los valores más altos se presentan en los meses de abril a julio y disminuyo en los meses de noviembre a febrero en casi todo el estado, excepto en la región suroeste. El pico de ETo se muestra en mayo y en junio en las regiones del sur, con valores de ETo de 6 a 7.4 mm día<sup>-1</sup>. Los valores más bajos se encuentran en el mes de enero y en algunas zonas del centro y noreste del estado, inició desde diciembre.

Por la altura a la que se encuentra la región sur del estado (755-1800 msnm) recibe mayor concentración solar y mayores volúmenes de precipitaciones, por esta razón, los valores de ETo en esta zona son mayores en los meses abril a junio; el valor más bajo que se presentó en la región centro y norte del estado en el mes de enero se debe a las bajas temperaturas. (Tabari *et al.*, 2012) menciona que, en regiones semiáridas, los valores altos de ETo se deben a una humedad relativa baja y una mayor velocidad del viento en la región, agregando que la dirección de los vientos y las diferentes alturas del terreno disminuyen la similitud climática.



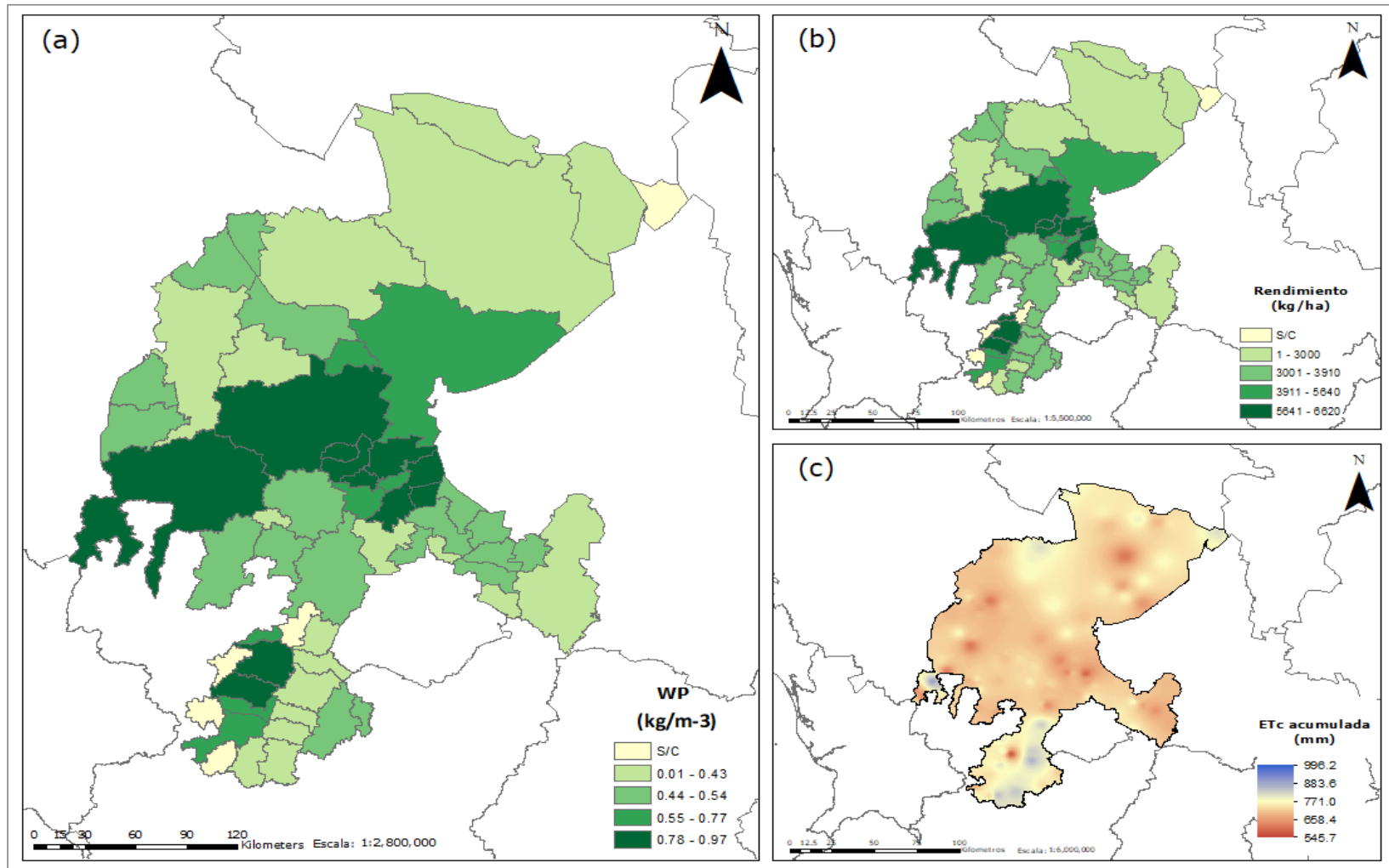
**Figura 39.** Distribución espacial de la Evapotranspiración de referencia por el método de Hargreaves-Samani (1981-2010).

### 5.5. Productividad del agua del cultivo (WP)

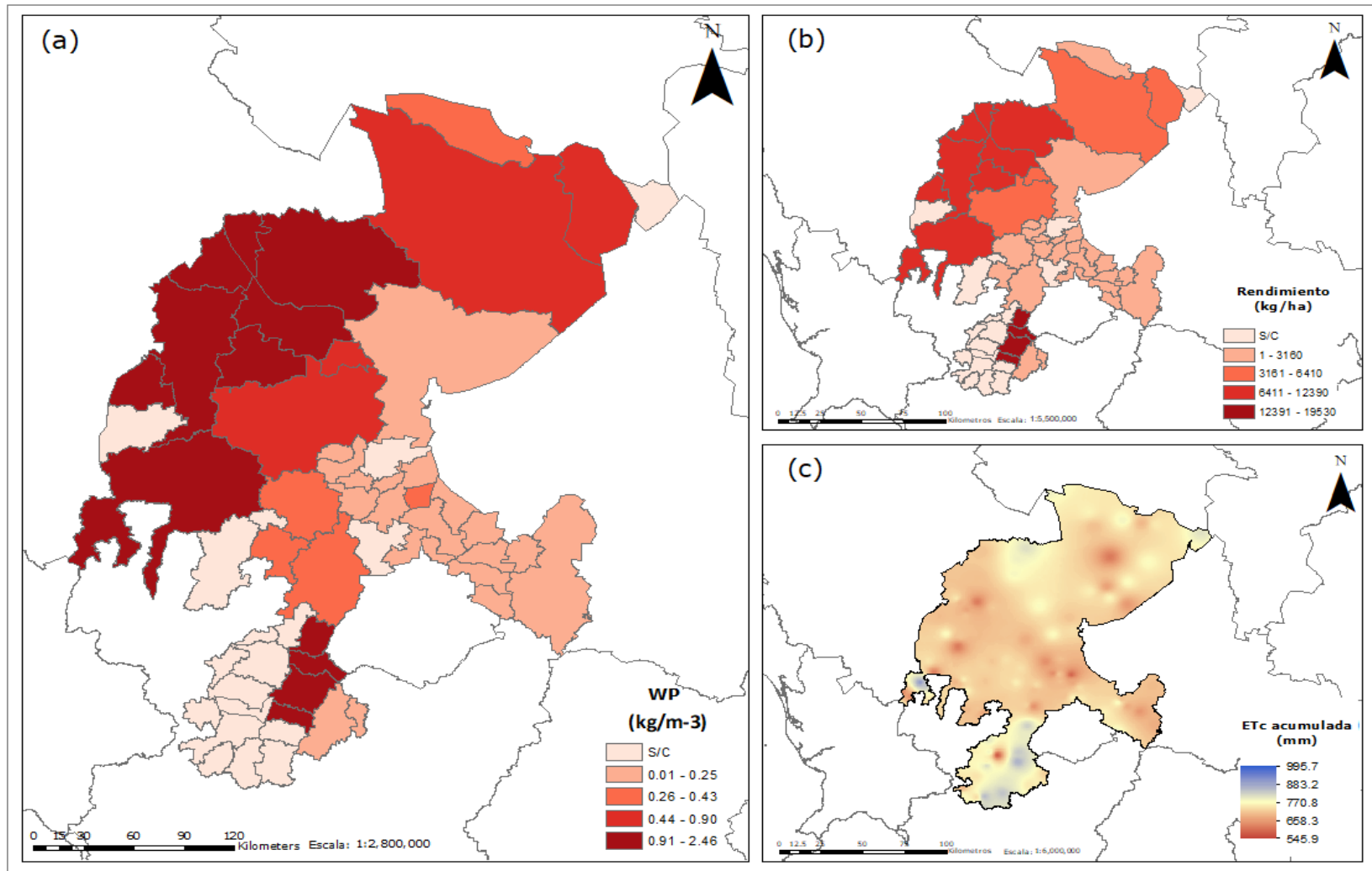
La distribución espacial de WP del cultivo de maíz, chile mirasol y frijol en el estado de Zacatecas de muestra en las Figuras 40(a), 41(a) y 42(a).

La WP de maíz grano disminuyó de este a oeste, lo que coincide con la distribución espacial del rendimiento (Figura 40 (b)). Los municipios con valores más elevados de CWP de maíz se encuentran al centro del estado, misma zona donde se encuentran distribuidas mayor número de unidades de riego, donde la WP fue más alta ( $0.88-1.02 \text{ kg m}^{-3}$ ) en contraste con los valores más bajos de WP al norte del estado ( $0.01-0.46 \text{ kg m}^{-3}$ ). En cuanto al análisis de la WP de chile mirasol en el estado se muestra que disminuyó la productividad de oeste a este, mostrando la misma tendencia en los valores de rendimiento en la Figura 41(b). Los valores más altos de WP se presencian al noroeste del estado ( $0.90-2.46 \text{ kg m}^{-3}$ ), mientras que la zona con valores bajos de WP se encuentran al este y sur del estado ( $0.01-0.25 \text{ kg m}^{-3}$ ). En la zona noroeste se muestra una elevado WP en comparación con el rendimiento. Por otra parte, la distribución de la WP de frijol se muestra en la Figura 42 (a), se aprecia la productividad del agua de cultivo es mayor en la región sureste y algunos municipios al noroeste del estado ( $0.50-0.58 \text{ kg m}^{-3}$ ), por otra parte los municipios con menor WP se ubican en la región noreste y sur del estado ( $0.01-0.31 \text{ kg m}^{-3}$ ); misma tendencia la cumple la distribución del rendimiento del cultivo de chile mirasol (Figura 42 (b)).

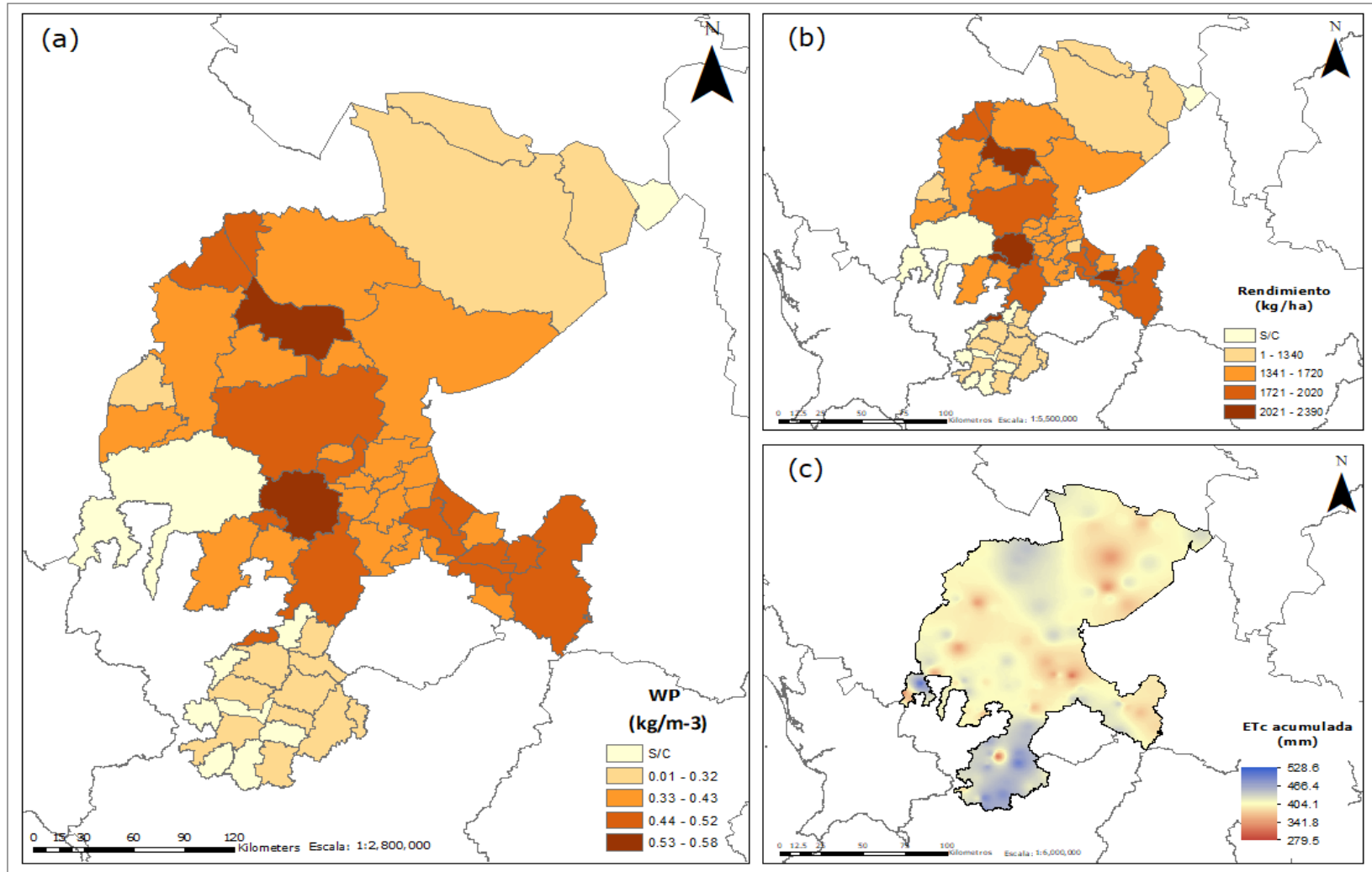
En cuanto a la distribución espacial de ETc total acumulada del cultivo de maíz (Figura 40 c)), se muestra que la región con mayor pérdida por ETc se encuentra al norte y sur del estado, que varía de 880 a 996 mm, la región centro, donde hay mayor presencia de unidades de riego, la ETc oscila 540 a 770 mm. En el caso de ETc del cultivo de chile mirasol (Figura 41 (c)) también perfila con altos índices de ETc en la región sur del estado con 790 a 995 mm, mientras que en la región centro norte aprecia un rango de 545 a 700 mm, zona estratégica donde hay mayor superficie destina al cultivo de chile. Finalmente la distribución espacial del cultivo de frijol se muestra en la Figura 42 (c), donde se muestra ETc menor, en comparación con el cultivo de chile mirasol y maíz grano, debido al corto ciclo de cultivo que presenta el frijol. La región con mayor ETc se encuentra al sur y centro-norte del estado con un rango de ETc de 420 a 528 mm, mientras que en la región noreste el ETc registró valores de 279 a 400 mm.



**Figura 40.** Distribución espacial a) productividad del agua (WP), b) rendimiento y c) evapotranspiración acumulada del cultivo de maíz (ETc) en el estado de Zacatecas.



**Figura 41.** Distribución espacial a) productividad del agua (WP), b) rendimiento y c) evapotranspiración acumulada del cultivo de chile mirasol (ETc) en el estado de Zacatecas.



**Figura 42.** Distribución espacial a) productividad del agua (WP), b) rendimiento y c) evapotranspiración acumulada del cultivo de maíz (ETc) en el estado de Zacatecas.

## VI. CONCLUSIONES

El Estado de Zacatecas cuenta con mayor superficie de temporal y su agricultura es caracterizada en mayor proporción en el ciclo primavera-verano (96 %); los principales cultivos sembrados en el estado son avena forrajera en verde, ajo, maíz grano, frijol, alfalfa, durazno, tuna, entre otros. A su vez se demostró que la superficie sembrada disminuyó un 5.6 % en el periodo de 2003-2018 y la siniestralidad en los cultivos es alta para la agricultura de temporal. El estado de Zacatecas cuenta con una superficie de riego de 13.6 % de la superficie total para la agricultura distribuida en la región centro-oeste, centro y sur del estado. Los municipios de Jalpa, Villa de Cos, Pánuco, Pinos y Fresnillo demostraron ser de gran importancia por emplear el 50 % de la superficie sembrada destinada para riego en el estado.

La distribución de la precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima ocurre con mayor incidencia en la región suroeste del estado, disminuyendo en la región centro y norte, el mismo comportamiento se presenta en los registros de temperatura y precipitación extremas. La temporada de lluvias inicia en mayo y finaliza en el mes de octubre, las máximas temperaturas en el estado son características de mayo a septiembre y los meses con bajas temperaturas son de noviembre a febrero. Por otra parte se observó que los periodos húmedos y secos (precipitación) cada vez son más cortos en los últimos años.

Los resultados de los análisis de varianza y regresión lineal en los métodos de ETo con datos climáticos fueron crecientes en los meses de mayo-agosto y decrecientes en los meses de octubre-diciembre. La ETo más alta se presentó en la región suroeste del estado, con valores máximos de 7.4 mm/día en el mes de mayo, mientras que en la región centro y noreste mostró valores de ETo máximos de 6.5 mm día<sup>-1</sup>, además la ETo más baja se presentó en el mes de enero en un rango de 2-4 mm día<sup>-1</sup>. Para la estimación de ETo con el método de Hargreaves-Samani se obtuvo una R<sup>2</sup> de 0.94 comparado con el método de la FAO 56 y se recomienda el uso de este método para la evaluación de ETo debido a que usa variables que se encuentran disponibles en la mayoría de las estaciones climáticas.

Los valores de WP calculados para los principales cultivos agrícolas en la modalidad de riego en el ciclo primavera-verano, mostraron que los cultivos de maíz grano y chile mirasol cuentan con mayor productividad del agua, los mayores índices de productividad se mostraron con mayor incidencia en la región centro para el caso de maíz grano y noroeste para el chile

mirasol, la distribución del rendimiento de cultivo en los municipios de Zacatecas muestran un comportamiento semejando a la distribución de WP. En cuanto a los valores de ETc, se presentaron volúmenes altos en el cultivo de maíz y chile mirasol, debido a la duración de su ciclo de cultivo. La distribución del volumen de ETc se observa con mayor ocurrencia en la región suroeste y norte del estado, las zonas con menor ETc resultaron ser más productivas.

## VII. REVISIÓN DE LITERATURA

- Ahmadi SH, Hamid RF. 2008. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ETo in South of Iran. *Irrigation and Drainage*. 58: 234-245 (2009). DOI: 10.1002/ird.409
- Al-Ghobari HM. 2000. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. *Irrigation Science* 19: 81–86
- Allen, G.R., Periera, L. S., Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 323 p.
- Bessembinder JJE, Leffelaar PA, Dhindwal AS, Ponsioen TC. 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management* 73: 113–130.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. 2018. Estadísticas del agua en México 2018. Edición 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). D. F., México. 768 p
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego Año agrícola 2016-2017. Edición 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). D. F., México. Pp 13
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Crop water requirements. FAO Irrig Drain. Paper No. 24. Rome, Italy: FAO
- Droogers, P. and R.G. Allen 2002. Estimating Reference Evapotranspiration Under Inaccurate Data Conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16(1):33-45.

- Eccel, E. 2012. Estimating air humidity from temperature and precipitation measures for modelling applications. *Meteorological Applications*, 19(1), 118–128. <https://doi.org/10.1002/met.258>
- Food and Agriculture Organization, (FAO), 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura (72 pp). Roma, Italia: FAO.
- Hansen, S. 1984. Estimation of potential and actual evapotranspiration. *Nordic Hydrol.* 15(4–5), 205–212.
- Hargreaves, G. H. and Allen, R. G. 2003. History and evaluation of Hargreaves equation. *J. Irrigation Drainage Engineering-ASCE*. 129:53-63.
- Hargreaves, G. H. and Sumani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperatura. *Applied Eng. Agric.* 8:96-99.
- Heydari, M.M., Noushabadi, R.N., Vahedi, M., Abbasi, A., Heydari, M. 2013. Comparison of evapotranspiration models for estimating referenceevapotranspiration in arid environment. *Middle-East J. Sci. Res.* 15, 1331–1337.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. 2014. Sistema de Información Geográfica. Sitio web de INEGI. <https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, INIFAP. 2003. Potencial productivo de especies agrícolas en el estado de Zacatecas. Retrieved from <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/PotAgric/ChileR.pdf>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, INIFAP, 2006. S E Q U Í A: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México. Retrieved from: [http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/SEQUIA\\_Vulnerabilidad\\_impacto.pdf](http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/SEQUIA_Vulnerabilidad_impacto.pdf)
- Jensen, M.E. and H.R. Haise, 1963. Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Davison* 93(IR3):15-41.

- Kassam AH, Molden D, Fereres E, Doorenbos J. 2007. Water productivity: science and practice—introduction. *Irrigation Science* 25: 185–188.
- Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. 2003. Water productivity in agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, CABI Publication, Wallingford UK. 332p. Recuperado el 22 de septiembre de 2019, de <http://www.cabi.org/cabebooks/ebook/20033158264/>
- Li, H., Zheng, L., Lei, Y., Li, C., Liu, Z., & Zhang, S. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management*, 95(11), 1271–1278. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.05.003>
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists* 11:277-288.
- Martínez-Cob A, Tejero-Juste M. 2004. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semiarid regions. *Agric Water Manage* 64(3): 251-264
- Mejía-Sáenz, E., P. Vélez E., A. Exebio G. y A.L. Santos H. 2001. Problemas Operativos en el Manejo del Agua en Distritos de Riego. *Terra*. 20: 217-225
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hidrology and Earth Systems Sciences*, 15(5), 1577-1600.
- Milly, P., Dunne, K. & Vecchia. 2005. A. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438, 347–350 DOI: 10.1038/nature04312
- Molden D, Sakthivadivel R, Christopher JP, de Fraiture C, Wim HK. 1998. Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems. IWMI Research Report no. 20. International Water Management Institute (IWMI): Colombo, Sri Lanka.
- Molden D. 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper IIMI: Colombo.
- Palacios V., E. y A. Exebio G. 1993. Métodos de distribución y eficiencias en el uso del agua en los sistemas de riego. Diplomado de Uso Eficiente del Agua y la Energía. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

- Allen, R. G. *et al.* (1998) 'Fao,1998', *Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO*, p. 300. doi: 10.1016/j.eja.2010.12.001.
- Comision nacional del agua (CONAGUA) (2018) 'Estadísticas Agrícolas de las Unidades de Riego, Año agrícola 2016 - 2017', pp. 1–925.
- Comision Nacional del Agua (CONAGUA) (2018) *Estadísticas del Agua en México*. 2018th edn. Edited by secretaria de medio ambiente y R. Naturales and C. nacional del Agua. Ciudad de México. C.P. 11320.
- Heydari, N. (2014) 'Water productivity in agriculture: Challenges in concepts, terms and values', *Irrigation and Drainage*, 63(1), pp. 22–28. doi: 10.1002/ird.1816.
- Li, H. *et al.* (2008) 'Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology', *Agricultural Water Management*, 95(11), pp. 1271–1278. doi: 10.1016/j.agwat.2008.05.003.
- Popova, Z., Kercheva, M. and Pereira, L. S. (2006) 'Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to south Bulgaria', *Irrigation and Drainage*, 55(2), pp. 201–215. doi: 10.1002/ird.228.
- Shi, Z. *et al.* (2017) 'Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: implications for ecological projects and agricultural production', *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Springer Berlin Heidelberg, 31(1), pp. 257–273. doi: 10.1007/s00477-015-1203-5.
- Tabari, H. *et al.* (2012) 'Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran', *Hydrological Processes*, 26(4), pp. 500–512. doi: 10.1002/hyp.8146.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972. On the Assessment of Sur-face Heat Flux and Evaporation Using Large Scale Parameters. *Monthly Weather Review* 100:81-92.
- Red Nacional de Estaciones Agrometereológicas Automatizadas INIFAP 2019 Estaciones por estado. Disponible en: <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones/MapaEstaciones> (Revisado el 20 de marzo de 2019).

- Reyes-Martínez, A., Q. Soto M.L. 2009. Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora. *Revista Digital Universitaria*. Volumen 10 Número 6
- SAGARPA, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, P. y A. 2015. *Agenda Técnica Agrícola de Zacatecas*. México.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., E.A., Santos. 2010. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 635-644.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP. 2017. Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera. Consulta en: [http://nube.siap.gob.mx/cierre\\_agricola](http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola) (23/04/19)
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP. 2019. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Revisado el 3 de abril de 2019).
- Shi, Z., Xu, L., Yang, X., Guo, H., Dong, L., Song, A., ... Shan, N. 2017. Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: implications for ecological projects and agricultural production. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(1), 257–273. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1203-5>
- Thornthwaite, C. W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*. 38, (1948) 55-94.
- Turc, L. 1962. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron*, 12, 13–49.
- Walter, I. A.; Allen, R. G.; Elliot, R.; Itenfisu, D.; Brown, P.; Jensen, M. E.; Mecham, B.; Howell, T. A.; Snyder, R.; Eching, S.; Spofford, T.; Hattendorf, M.; Martin, D.; Cuenca, R. H. and Wright, J. L. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE and EWRI. 70 p.

Xu M, Chang CP, Fu C, Qi Y, Robock A, Robinson D, Zhang H. 2006. Disminución constante de los vientos monzónicos del este de Asia, 1969–2000: evidencia de mediciones directas en tierra de la velocidad del viento. *J Geophys Res Atmos* 111: D24

Zetina-Espinosa, A.M., M. Flores J., M.A. Martínez D., Cruz-Jiménez J. y T. Delgado R. 2012. Valor Económico del Agua en el Distrito de Riego 044, Jilotepec, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. Volumen 10 Número 2.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1. Información de cartas vectoriales, fuente y características.

<b>BASE DE DATOS 2019</b>			
<b>ESTADO DE ZACATECAS</b>			
CARPETA	FUENTE	NOM_ARCHIVO	CARACTERÍSTICAS
Climatología	INEGI	Cánicula	Información cartográfica que integra datos de los climas existentes en el país y de sus principales elementos como son la temperatura y precipitación a través de cartas climáticas, atlas, estudios, productos cartográficos digitales y otras publicaciones.
	SINA	Est_climatologicas	
	INEGI	Evapo_2004	
	INEGI	PP_medannual2006	
	INEGI	sequia2017	
	INEGI	clima	
Fisiografía	INEGI	Fisiografia	Visión general de las formas del relieve, identificadas y definidas a partir del análisis integral de la información topográfica, geológica, hidrológica y edafológica, para formar unidades relativamente homogéneas, representado las diferentes provincias y sub provincias en las que se ha dividido al país, de acuerdo con su geología y topografía.
Hidrografía	SINA	calidad_agua_puntos	Información estructurada como un sistema lineal que modela el drenaje a través de arroyos y ríos en cada cuenca hidrográfica. Útil para el análisis de caudales y de cuencas. Sus componentes son Líneas de Flujo de Agua (red hidrográfica), Puntos de Drenaje o salida de cuencas, Divisorias de Subcuenca (Polígonos), Cuenca y Región Hidrológica e información complementaria como cuerpos de agua y toponimia.
	SINA	fenomenos_hidrometer	
	SINA	lagos_pr_zac	
	INEGI	red_hidrografica	
	SINA	rios_pr_zac	
Hidrología	SINA	Acuif_disp_	Información que permite conocer las condiciones en las que se encuentra el recurso hídrico tanto superficial como subterráneo.
	SINA	cuencas_zac	
	SINA	ord_subterr	
	SINA	rh_zac	
	SINA	rha_zac	

	SINA	uso_consunt	
Suelo	INEGI	erosion_suelo14	Información geoespacial que muestra la distribución de los principales tipos de suelo en el territorio, así como los atributos físicos, químicos y limitantes físicas y químicas presentes, de acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo de la FAO (WRB por sus siglas en inglés).
	INEGI	Hum_suelo2005	
	INEGI	perfil_suelo14	
	INEGI	Uso de suelo y veg	
Geología	INEGI	Minas	El origen, clasificación y edad de las rocas, fallas, fracturas volcanes, minas y zonas hidrotermales entre otras
	INEGI	Fallas	
Uso potencial	INEGI	Uso_agricola	Incluye los tipos de utilización agrícola, pecuaria y forestal que muestran la posibilidad de ser establecidos en el terreno, así como también el grado en que los requerimientos técnicos y biológicos de cada tipo de utilización pueden satisfacerse por el conjunto de condiciones ambientales del terreno.
	INEGI	Uso_pecuario	
	INEGI	Uso_forest	
Topografía	INEGI	c_nivel_1_1_000_000	Contiene información sobre curvas de nivel a escala de 1:1 000 000 y 1:250 000 además de la red vial.
	INEGI	c_nivel_1_250_000	
	INEGI	carretera	
	INEGI	Red vial	
Zacatecas	SINA	Dist_riego	Incluye información de la frontera agrícola, unidades de riego y distritos de riego en el estado de Zacatecas, índice de marginación, superficie de estados y municipios del país.
	SIAP	Frontera_AG_II	
	SINA	Ind_marginacion	
	CONABIO	Municipios	
	CONABIO	Pais	
	INEGI	UR_ZAC_UTM	
	INEGI	UR_ZAC_CORR	
	CONABIO	ESTADO	
SIAP	FRONTERA_AGRICOL_ZAC		

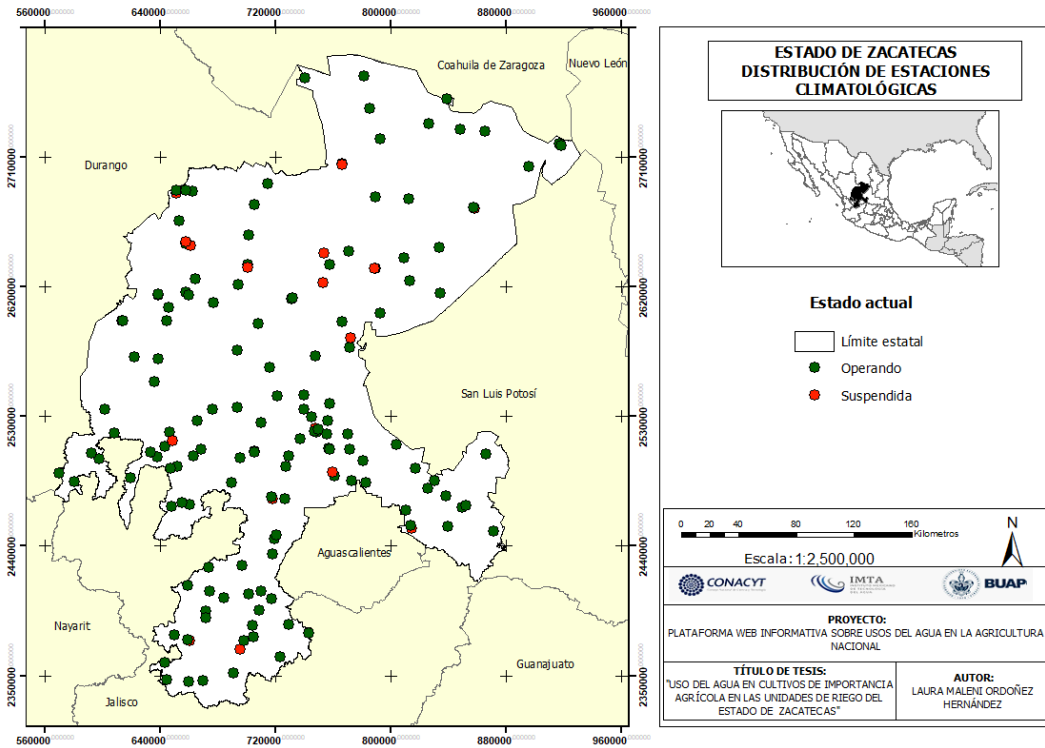


Figura 43. Distribución de estaciones climáticas en el estado de Zacatecas.

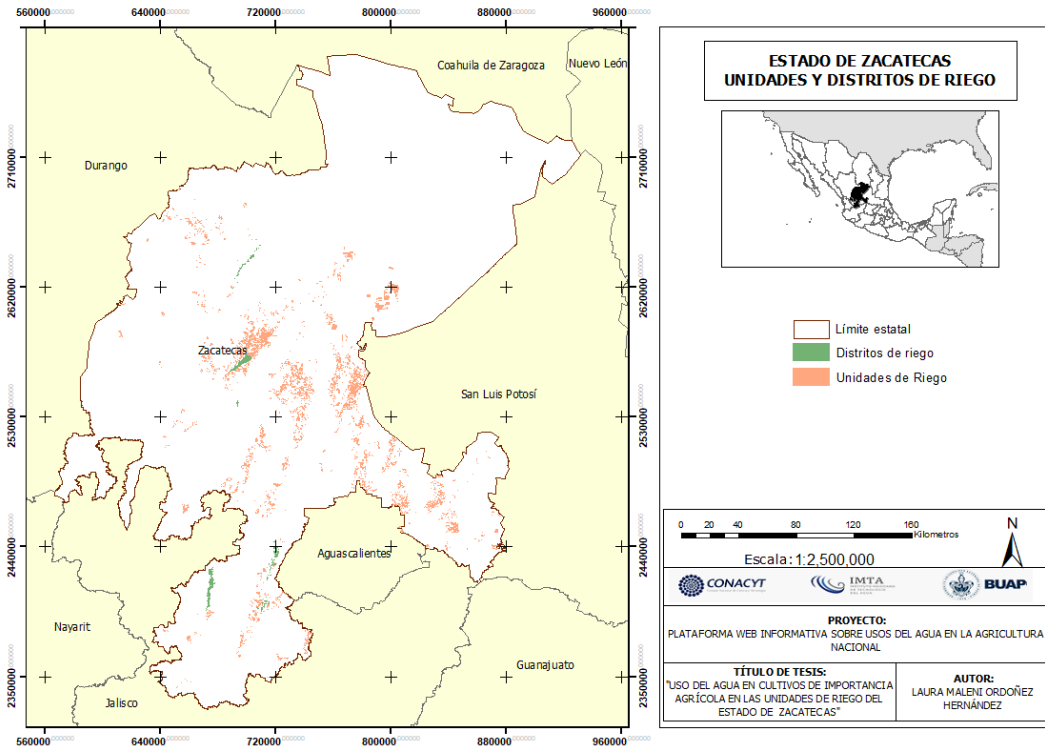


Figura 44. Distribución de Unidades y Distritos de Riego en el estado de Zacatecas.

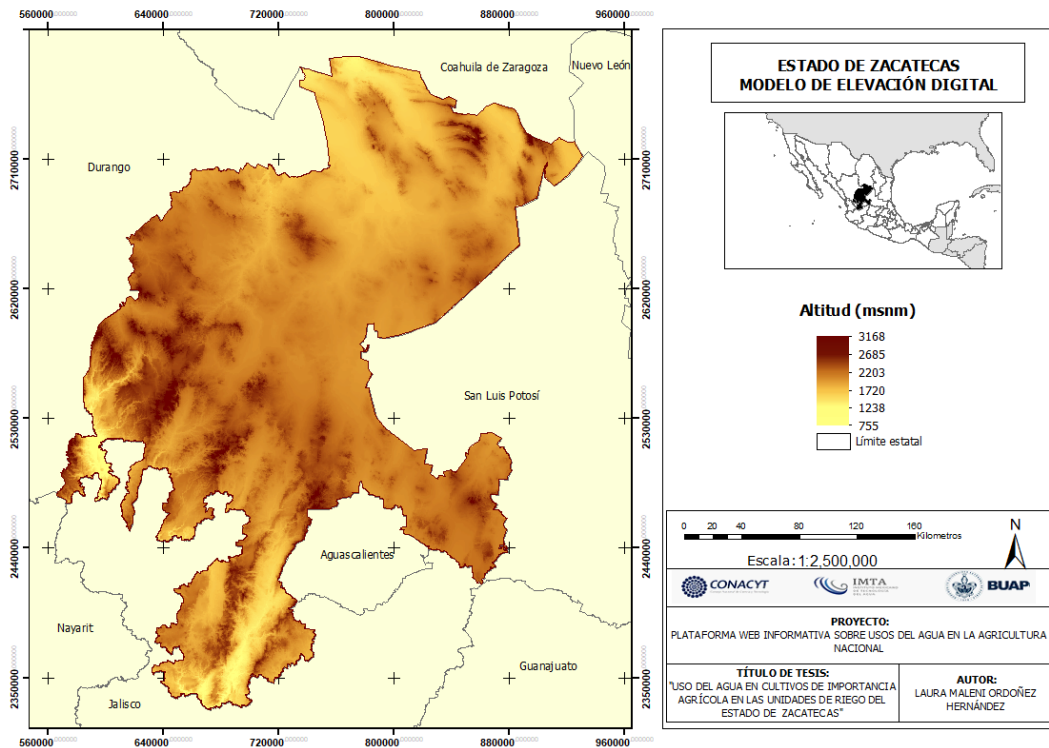


Figura 45. Modelo de Elevación Digital (DEM) del estado de Zacatecas.

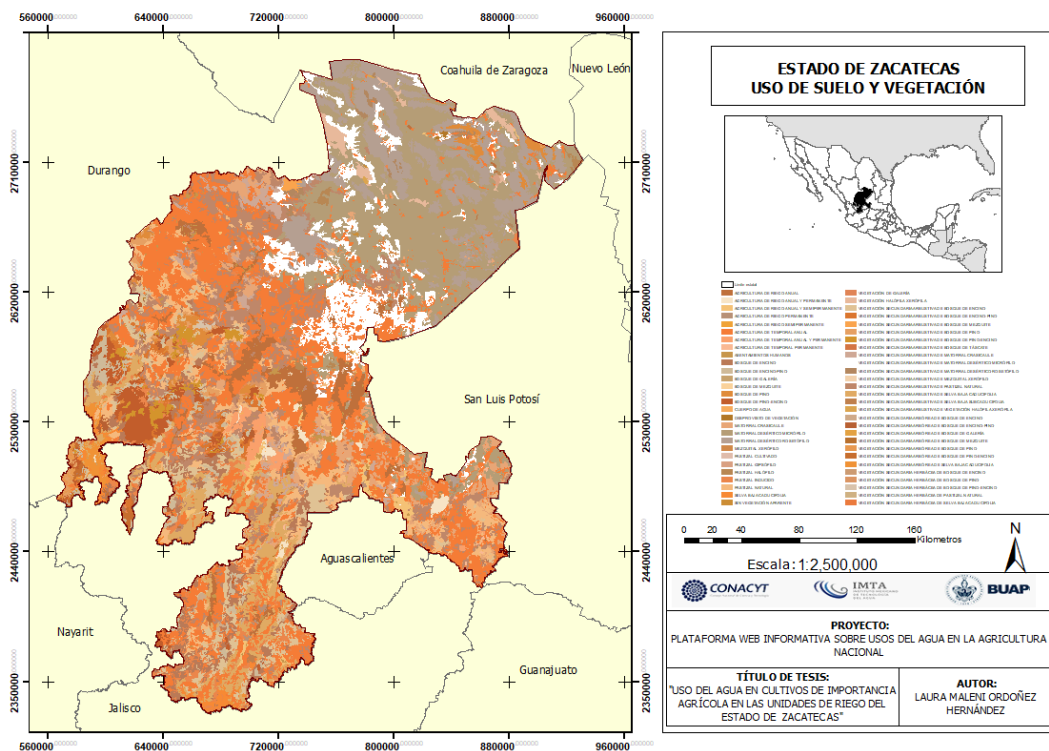


Figura 46. Distribución del uso de suelo y vegetación del estado de Zacatecas.

## ANEXO 2. Estaciones climáticas del estado de Zacatecas

DATOS DE ESTACIONES									
CLAVE	NOM	LAT	LONG	ALT	CLAVE	NOM	LAT	LONG	ALT
32001	AGUA NUEVA	23.78333	-102.160278	1946	32086	ZACATECAS (DGE)	22.76139	-102.576667	2352
32002	BOCA DEL TESORERO	22.82361	-102.951667	2108	32087	CONCEPCION DEL ORO	24.62139	-101.389444	1931
32003	CALERA	22.90861	-102.659722	2097	32093	EL ARENAL	23.64972	-103.4475	2219
32005	CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR	23.60222	-102.733889	2046	32095	PAJARITOS DE LA SIERRA	22.52083	-104.318611	2596
32006	EL CAZADERO	23.69306	-103.693056	1862	32097	TENAYUCA	21.50278	-102.6525	1865
32007	CEDROS	24.6775	-101.773056	1781	32098	VALPARAISO	22.77278	-103.568611	1915
32010	CAOPAS	24.78167	-102.175	1986	32099	MALPASO	22.61694	-102.767222	2119
32011	CONCEPCIÓN DE LA NORMA	23.843	-101.96	2011	32100	SAN ISIDRO DE LOS GONZALEZ	22.84472	-103.3825	2017
32013	EL CHIQUE	22.00028	-102.889167	1648	32101	SAN JOSE DE LOS LLANETES	22.91167	-103.278056	2184
32015	EL RUSIO	22.44194	-101.785556	2122	32103	AMECA LA VIEJA	22.91889	-104.008611	1800
32016	EL PLATANITO	22.61139	-104.050833	1030	32104	RANCHO DE EN MEDIO	22.55583	-103.519444	1812
32018	EL SAUZ	23.28167	-103.108889	2096	32105	TLACHICHILA	21.56056	-102.786389	2202
32019	EXCAME	21.64944	-103.339722	1740	32106	CUEVA GRANDE	22.6625	-103.3575	2043
32020	FRESNILLO	23.17389	-102.890833	2201	32107	SIERRA HERMOSA	23.61806	-101.723056	2092
32021	COLONIA GONZÁLEZ ORTEGA	23.95667	-103.4475	2195	32108	CORRALES	23.23167	-103.643889	2256
32022	GRUÑIDORA	24.21444	-101.922222	1809	32109	SAN PEDRO DE LA SIERRA	22.77194	-103.944167	1893
32024	GUADALUPE VICTORIA	22.39583	-101.831489	2132	32111	JALPA	21.65222	-102.981389	1418
32025	HUANUSCO	21.7675	-102.968889	1490	32112	MILPILLAS DE ALLENDE	21.32972	-103.614167	1919
32026	JEREZ DE GARCIA SALINAS (DGE)	22.64278	-103.001944	2000	32113	PASTORIA	22.54444	-103.566389	1867
32027	JIMENEZ DE TEUL	23.24889	-103.804722	1924	32114	VILLA GONZALEZ ORTEGA	22.52056	-101.917222	2154
32028	JUAN ALDAMA	24.28167	-103.397778	1999	32116	ADJUNTAS DEL REFUGIO	22.62361	-103.411667	1952
32029	JUCHIPILA (SMN)	21.40472	-103.114167	1259	32117	LAS ANIMAS	22.49056	-103.838889	1947
32030	LA FLORIDA	22.68611	-103.6025	1870	32118	LOS CAMPOS	22.01833	-101.854722	2103
32032	LA VILLITA	21.60472	-103.337778	1786	32119	FELIPE ANGELES	22.54806	-102.790833	2092
32033	LORETO	22.26472	-101.985556	2077	32120	GENARO CODINA	22.4875	-102.46	2176
32034	PUERTO SAN FRANCISCO	23.73556	-103.387222	2331	32121	GUADALUPE	22.74694	-102.506667	2262
32036	MAZAPIL	24.64056	-101.555633	2274	32122	LUIS MOYA	22.43889	-102.251667	2017

32037	MONTE ESCOBEDO	22.30694	-103.561667	2182	32123	MESILLAS	23.47389	-103.581389	2181
32038	NIEVES	24.00139	-103.019444	1913	32124	MOMAX	21.92333	-103.316389	1649
32039	NOCHISTLAN	21.3575	-102.845556	1853	32125	MOYAHUA DE ESTRADA	21.25889	-103.156944	1180
32041	OJO CALIENTE	22.57778	-102.269444	2062	32126	PALMILLAS	22.65333	-102.355	2169
32042	PALOMAS	22.34722	-102.796667	2015	32127	PINO SUAREZ	22.11778	-101.399167	2119
32046	SAIN ALTO	23.58	-103.263889	2071	32129	PRESA SUSTICACAN	22.60972	-103.0975	2030
32047	SAN ANTONIO DEL CIPRES	22.94083	-102.4875	2173	32130	EL ROMERILLO	22.62028	-103.653056	2085
32048	San Benito	23.90278	-101.719167	1941	32131	SAN GERONIMO	22.65722	-102.495833	2266
32050	SAN GIL	24.19583	-102.978333	1829	32132	TEPETONGO	22.45472	-103.153611	1944
32051	SAN PEDRO PIEDRA GORDA	22.45306	-102.347222	2053	32133	FELIPE ANGELES	23.55556	-103.566944	2195
32052	SAN RAFAEL	24.59	-102.110833	2014	32134	MILPILLAS DE LA SIERRA	23.09194	-103.671111	2371
32053	SANTA ROSA	22.92583	-103.112778	2236	32135	POTRERO DE GALLEGOS	22.64972	-103.699722	2017
32054	SOMBRERETE (DGE)	23.63472	-103.639722	2300	32136	VICENTE GUERRERO	22.31583	-103.44	1925
32055	TLAYAHUA	22.09778	-102.871944	1729	32137	CHICHIMEQUILLAS	23.24139	-102.574722	2072
32057	TLALTENANDO SANCHEZ ROMAN	21.77351	-103.309444	1685	32139	HUITZILA	21.22389	-103.605833	1680
32058	TRANCOSO	22.74556	-102.369444	2200	32140	MEZQUITAL DEL ORO	21.2125	-102.363889	1208
32059	VILLA DE COS	23.28889	-102.344267	1999	32141	EL SALVADOR	24.52083	-10.871667	1726
32061	VILLA HIDALGO	22.34722	-101.715833	2195	32142	TIERRA Y LIBERTAD	23.45028	-102.389167	2030
32065	CHALCHIHUITES (SMN)	23.47194	-103.88	2313	32143	GARCIA DE LA CADENA	21.20694	-103.458889	1712
32068	PINOS (SMN)	22.28278	-101.580833	2385	32144	SAN FRANCISCO (DGE)	24.32222	-102.884444	1690
32069	SAN JUAN CAPISTRANO	22.64528	-104.100556	1197	32184	LOS FRESNOS	21.7325	-103.214722	2072
32070	TEUL DE GONZALEZ ORTEGA (DGE)	21.46861	-103.461944	1909	32187	ESPIRITU SANTO	22.60444	-101.438611	2007
32072	VILLA GARCIA (DGE)	22.16639	-101.951944	2110	5004	BAJIO DE AHUICHILA (COAHUILA)	25.11611	-102.632222	1300
32073	VILLANUEVA (DGE)	22.36278	-102.889167	1935	18031	SAN JUAN PEYOYAN (JALISCO)	22.36111	-104.431667	639
32078	SAN TIBURCIO (DGE)	24.14778	-101.483611	1885	14038	CUIXTLA, JALISCO	21.05194	-103.438889	1000
32084	SAN ANDRES	23.69944	-101.93	2087	19129	PEÑUELO (NUEVO LEON)	24.56389	-100.772778	1840
32085	SANTA LUCIA	22.46806	-104.216667	2203	19137	SAN JORGE (N.L.)	24.57806	-100.446944	1890

### Anexo 3.

#### Anexo 3. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante el uso de fórmulas empíricas

##### Método Hargreaves-Samani

La ecuación de Hargreaves (1985) conocida como una alternativa cuando no se dispone de datos suficientes para resolver la ecuación de la FAO-56 Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998), se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = 0.0023R_a(T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (5)$$

Dónde:

- ET<sub>o</sub>:** Evapotranspiración de referencia [mm/día].
- R<sub>a</sub>:** Radiación extraterrestre [MJ/m<sup>2</sup>/día], (Ecuación 2).
- T<sub>med</sub>:** Temperatura media [°C].
- T<sub>max</sub>:** Temperatura máxima [°C].
- T<sub>min</sub>:** Temperatura mínima [°C].

##### a. Radiación extraterrestre para periodos diarios (R<sub>a</sub>)

La radiación solar extraterrestre (R<sub>a</sub>) es la radiación solar recibida en la parte superior de la atmosfera terrestre sobre una superficie horizontal (Allen *et al.*, 1998). La R<sub>a</sub>, para cada día del año y para diversas latitudes se estima a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (6)$$

Donde:

- R<sub>a</sub>:** Radiación extraterrestre [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>].
- G<sub>sc</sub>:** Constante solar = 0.082 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>.
- d<sub>r</sub>:** Distancia relativa inversa Tierra-Sol (Ecuación 3).
- ω<sub>s</sub>:** Ángulo de radiación a la puesta de sol (Ecuación 5).
- φ:** Latitud [rad].

( $\delta$ ): Declinación solar [rad] (Ecuación 4).

- **Distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ )**

$$d_r = 1 + 0.33 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (7)$$

Donde:

**$d_r$ :** Distancia relativa inversa Tierra-Sol.

**$J$ :** Es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

- **Declinación solar ( $\delta$ ),** están dadas por:

$$\delta = 0.409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (8)$$

Donde:

**$\delta$ :** Declinación solar (rad).

**$J$ :** Es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

- **Ángulo de radiación a la hora de la puesta de sol ( $\omega_s$ )**

El valor se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (9)$$

Donde:

**$\omega_s$ :** Ángulo de radiación a la hora de la puesta de sol (rad).

**$\delta$ :** Declinación solar (rad).

**$\varphi$ :** Latitud (rad).

#### 4.6.2. Método Turc

El método de Turc (1961) estima la evapotranspiración de referencia en mm/día, se expresa como:

$$ET_o = (0.3107 * R_s + 0.65) * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15}\right) \quad (10)$$

Donde:

**$ET_o$ :** Evapotranspiración de referencia [mm/día].

$R_s$ : Radiación solar [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ], (Ecuación 7).

$T_{med}$ : Temperatura media [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### a) Radiación solar ( $R_a$ )

Para la estimación de la Radiación solar se empleó la fórmula de Samani (2002), el cual fue recomendado por Allen *et al.*, (1998):

$$R_s = K_{RS}(T_{max} - T_{min})^2 R_a \quad (11)$$

Donde:

$R_s$ : Radiación solar [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ].

$K_{RS}$ : Coeficiente de ajuste 0.16.

$T_{max} - T_{min}$ : Temperatura máxima y temperatura mínima [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$R_a$ : Radiación extraterrestre [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ], (Ecuación 2).

### Método Thornthwaite

Thornthwaite (1948) correlacionó la temperatura media mensual con ET a partir del balance hídrico. La fórmula de Thornthwaite para el cálculo de ET mensual no corregida ( $\text{mm/día}$ ) es la siguiente:

$$ET_{mensual} = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \quad (12)$$

Donde:

$T$ : Temperatura media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ )

$a$ : Coeficiente:  $0.49 + 0.0179 I - 0.0000771 I^2 + 0.000000675 I^3$

$I$ : Índice térmico anual

Posteriormente el valor obtenido se corrige de acuerdo con la duración real del mes y las horas de sol respecto a la latitud con la siguiente ecuación:

$$ET_{corregida} = ET_{mensual} \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{d}{30} \right) \quad (13)$$

Donde:

$ET_{o \text{ mensual}}$ : Evapotranspiración de referencia [ $\text{mm/día}$ ].

$N$ : Duración máxima posible de insolación.

**d:** Número de días del mes.

### Método Priestley-Taylor

El método Priestley-Taylor (1972) es uno de los más aplicados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia basado en la radiación, se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} (R_n - G) \quad (14)$$

Dónde:

- ET<sub>o</sub>:** Evapotranspiración [ $\text{mm}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ].
- $\alpha$ :** Constante derivada empíricamente y fue definida como 1.26 por Priestley y Taylor (1972).
- $\lambda$ :** Calor latente de vaporización a 20° C [ $2.45 \text{ MJ/kg}^{-1}$ ].
- $\Delta$ :** Pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ], (Ecuación 11).
- $\gamma$ :** Constante psicrométrica [ $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ], (Ecuación 12).
- $R_n$ :** Radiación solar neta [ $\text{MJ/m}^2$ ], (Ecuación 13).
- $G$ :** Flujo de calor del suelo [ $\text{MJ/m}^2$ ], (Ecuación 17).

#### a) Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ( $\Delta$ )

Para el cálculo de la pendiente de la curva a una temperatura dada se empleó la fórmula recomendada por Allen *et al.*, (1998), la cual se expresa:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (15)$$

Donde:

- $\Delta$ :** Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ],
- T:** Temperatura media del aire a 2 m de altura [ $^\circ\text{C}$ ].

#### b) Constante psicrométrica ( $\gamma$ )

La constante psicrométrica se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} \quad (16)$$

Donde:

- $\gamma$ :** Constante psicrométrica [kPa °C],
- $P$ :** Presión atmosférica [kPa].
- $\lambda$ :** Calor latente de vaporización 2.45 [MJ kg<sup>-1</sup>].
- $c_p$ :** Calor específico a presión constante  $1.013 \times 10^{-3}$  [MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>].
- $\varepsilon$ :** Cociente del peso molecular de vapor de agua / aire seco = 0.622.

### c) La radiación solar neta ( **$R_n$** )

La  $R_n$  es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. La  $R_n$  es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para  $R_n$  es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas (Allen *et al.*, 1998).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (17)$$

Donde:

- $R_{ns}$**  Radiación solar neta de onda corta [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], (Ecuación 14).
- $R_{nl}$**  Radiación solar neta de onda larga [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], (Ecuación 15).

- **La radiación solar neta de onda corta ( $R_{ns}$ )**

La radiación neta de onda corta resulta del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada, está dada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (18)$$

Donde:

- $R_{ns}$ :** Radiación neta solar o de onda corta [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>].
- $\alpha$ :** Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo 0.23.
- $R_s$ :** Radiación solar entrante [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], (Ecuación 7).

- **Radiación solar neta de onda larga ( $R_{nl}$ )**

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann (Allen *et al.*, 1998).

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,k^4} + T_{min,k^4}}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (19)$$

Donde:

- Rnl:** Radiación neta de onda larga [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].
- $\sigma$ :** Constante de Stefan-Boltzmann [ $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].
- $T_{max,k}$ :** Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas [ $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$ ].
- $T_{min,k}$ :** Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [ $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,16$ ].
- $e_a$ :** Presión de saturación de vapor real [kPa], (Ecuación 16).
- Rs/Rso:** Radiación relativa de onda corta (valores  $\leq 1.0$ ),
- Rs:** Radiación solar medida o calculada [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].
- Rso:** Radiación en un día despejado [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].

- **Presión de saturación de vapor real ( $e_a$ ) derivada de la temperatura del punto de rocío**

Como la temperatura del punto de rocío es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarlo, la presión real de vapor ( $e_a$ ) es la presión de saturación de vapor a la temperatura del punto de rocío ( $T_{rocío}$ ):

$$e_a = e^o(T_{rocío}) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27 T_{rocío}}{T_{rocío} + 237.3} \right] \quad (20)$$

Donde:

- $e_a$ :** Presión de saturación de vapor real [kPa].
- $T_{rocío}$ :** Temperatura del punto de rocío.

#### **d) Flujo de calor del suelo (G)**

Como el flujo del calor del suelo es pequeño comparado a la Rn, particularmente cuando la superficie está cubierta con vegetación y los periodos de tiempo de cálculo son de 24 horas o

más, el procedimiento para periodos largos de tiempo, basados en la idea de que la temperatura del suelo tiene similar tendencia a la de la temperatura del aire se calcula de la siguiente manera:

$$G = C_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad (21)$$

Donde:

- G:** Flujo de calor del suelo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ].
- Cs:** Capacidad calorífica del suelo [ $\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ].
- Ti:** Temperatura del aire en el tiempo i [ $^\circ\text{C}$ ].
- Ti-1:** Temperatura del aire en el tiempo i-1 [ $^\circ\text{C}$ ].
- $\Delta t$ :** Intervalo de tiempo considerado [días].
- $\Delta z$ :** Profundidad efectiva del suelo [m].

### Método Makkink-Hansen

La fórmula propuesta por Makkink en 1957 para el cálculo de la evapotranspiración de referencia fue corregida por Hansen (1984) para el cálculo de tasas diaria de ET, se expresa:

$$ET_o = 0.7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} \quad (22)$$

Donde:

- ETo:** Evapotranspiración de referencia [ $\text{mm día}^{-1}$ ]
- $\Delta$ :** Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en [ $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ], (Ecuación 11).
- Rs:** Radiación solar [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ], (Ecuación 7).
- $\gamma$ :** Constante psicrométrica [ $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ], (Ecuación 12).
- $\lambda$ :** Calor latente de vaporización  $2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

### Método Blaney-Criddle

El método de Blaney-Criddle convertido a unidades métricas se describe a continuación (Doorenboss y Pruitt, 1977):

$$ET_o = a + b[P(0.46T_{media} + 8.13)] \quad (23)$$

Donde:

- ETo:** Evapotranspiración de referencia [ $\text{mm}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ].

- P:** Porcentaje medio anual de horas diurnas para el período de estudio (diario o mensual) a diferentes latitudes (Doorenboss y Pruitt, 1977).
- T<sub>media</sub>:** Temperatura media [°C].
- a y b:** Coeficientes a y b de acuerdo a la zona de estudio.

### Método FAO 56 Penman-Monteith

El método Penman - Monteith, considerado como el método estándar para el cálculo de ETo, incluye datos de radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento como parámetros de entrada (Allen *et al.*, 1998). El método Penman-Monteith, se puede expresar de la siguiente manera:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (24)$$

#### Dónde:

- ETo** Evapotranspiración de referencia [mm/día].
- R<sub>n</sub>:** Radiación neta [MJ/m<sup>2</sup>], (Ecuación 13).
- G:** Flujo de calor del suelo [MJ/m<sup>2</sup>], (Ecuación 17).
- T:** Temperatura media del aire [°C].
- u<sub>2</sub>:** velocidad del viento a 2 m de altura [m/s].
- e<sub>s</sub>:** presión de saturación de vapor [kPa], (Ecuación 21).
- e<sub>a</sub>:** presión de vapor real [kPa], (Ecuación 16).
- Δ:** pendiente de la curva de presión de vapor [kPa / °C], (Ecuación 11).
- γ:** Constante psicrométrica [kPa / °C], (Ecuación 12).

#### a) Presión media de saturación de vapor (e<sub>s</sub>)

La presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese periodo:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (25)$$

Donde:

$e^o$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura del bulbo húmedo [kPa]  
**Tmax y Tmin:** Temperatura máxima y mínimas del aire [°C] o Fahrenheit (°F).

**Anexo 4.** Rendimiento del cultivo por municipio en el estado de Zacatecas en el periodo (2003-2010)

No.	Municipios	Rendimiento (ton/ha <sup>-1</sup> )			No.	Municipios	Rendimiento (Ton/ha <sup>-1</sup> )		
		Chil e	Maíz z	Frijol ol			Chil e	Maíz z	Frijol l
1	Apozol	0.99	3.05	1.00	30	Momax	0.00	5.91	2.20
2	Apulco	0.00	3.20	1.04	31	Monte Escobedo	0.00	3.74	1.51
3	Atolinga	0.00	0.00	0.00	32	Morelos	1.38	5.64	1.61
4	Benito Juárez	0.00	0.00	0.00	33	Moyahua de Estrada	0.00	3.33	0.93
5	Calera	1.50	6.62	1.72	34	Nochistlán de Mejía	1.00	3.83	1.10
6	Cañitas de Felipe Pescador	5.47	5.01	1.63	35	Noria de Ángeles	1.14	3.35	2.08
7	Chalchihuites	10.9 0	3.14	1.13	36	Ojocaliente	1.03	3.27	1.99
8	Concepción del Oro	3.79	1.94	1.18	37	Pánuco	1.45	6.29	1.55
9	Cuauhtémoc	1.08	3.48	1.69	38	Pinos	1.02	2.95	1.81
10	El Plateado de Joaquín Amaro	0.00	0.00	0.00	39	Río Grande	12.5 2	3.66	2.39
11	El Salvador	0.00	0.00	0.00	40	Sain Alto	9.92	2.76	1.50
12	Fresnillo	5.00	6.59	1.86	41	Santa María de La Paz	0.00	5.29	0.00
13	Genaro Codina	0.00	2.95	1.59	42	Sombrerete	13.1 0	2.94	1.53
14	General Enrique Estrada	1.42	5.84	1.48	43	Susticacán	0.00	2.92	2.13
15	General Francisco R. Murguía	11.5 2	2.85	1.67	44	Tabasco	19.1 8	3.23	1.21
16	General Pánfilo Natera	1.12	3.34	1.83	45	Tepechitlán	0.00	6.20	1.06

17	Guadalupe	1.31	5.75	1.63	46	Tepetongo	2.75	3.49	1.67
18	Huanusco	0.00	3.42	1.26	47	Teúl de González Ortega	0.00	5.13	1.00
19	Jalpa	16.5 3	3.05	1.06	48	Tlaltenango de Sánchez Román	0.00	6.12	1.06
20	Jerez	3.06	3.91	2.37	49	Trancoso	1.26	5.44	1.34
21	Jiménez del Teul	0.00	3.32	1.36	50	Trinidad García de La Cadena	0.00	0.00	0.00
22	Juan Aldama	11.4 7	3.38	1.96	51	Valparaíso	9.48	5.88	0.00
23	Juchipila	0.00	3.00	0.00	52	Vetagrande	1.25	5.14	1.50
24	Loreto	1.01	3.63	2.02	53	Villa de Cos	1.42	5.56	1.54
25	Luis Moya	1.02	3.14	1.81	54	Villa García	1.00	2.90	1.61
26	Mazapil	4.17	2.13	1.24	55	Villa González Ortega	1.11	3.20	1.71
27	Melchor Ocampo	2.13	1.96	1.29	56	Villa Hidalgo	1.05	3.12	1.76
28	Mezquital del Oro	0.00	2.57	0.00	57	Villanueva	2.63	3.42	1.96
29	Miguel Auza	11.9 1	3.55	1.93	58	Zacatecas	1.40	4.98	1.48

---